

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

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

УДК 666.3:546.28'171]:621.914.22

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОКРЫТИЙ AlN И TiN ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ Si_3N_4 -TiC-КЕРАМИКИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Изучены особенности влияния покрытий AlN и TiN на напряженно-деформированное состояние структурных элементов Si_3N_4 -TiC-керамики, формирующих ее поверхностный слой, под действием комбинированной нагрузки. Установлено, что покрытие TiN более благоприятно влияет на напряженное состояние структурных элементов керамики, а покрытие AlN — на напряженное состояние границы между покрытием и керамикой.

Ключевые слова: Si_3N_4 -TiC-керамика, поверхностный слой (ПС), покрытия AlN и TiN, комбинированная нагрузка, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Основополагающим трендом в развитии наукоемких отраслей промышленности является прогресс на основе использования новых функциональных материалов. Этот тренд для разработчиков высокотемпературных установок и режущих инструментов для современной металлообработки означает потребность в керамических материалах, превосходящих тугоплавкие сплавы по высокотемпературным свойствам и способных обеспечить более высокий режим эксплуатации [1]. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяет Si_3N_4 -TiC-керамика, условия эксплуатации изделий из которой характеризуются сочетанием экстремально высоких тепловых и силовых нагрузок [2]. Постоянный поиск оптимального состава керамики [3–7], технологических процессов подготовки порошков и смесей [8–11], спекания заготовок [12–13], алмазной и лазерной обработки [14–17] и нанесения функциональных покрытий [18–21] позволяет создавать нитридную керамику с повышенной прочностью и трещиностойкостью [22–25]. Результаты этих экспериментальных исследований раскрывают

потенциал нитридной керамики и расширяют область применения изделий из нее. Общую картину перспектив применения нитридной керамики дополняют результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния ее поверхностного слоя (ПС) под действием разных нагрузок [26–28].

Цель работы — определить пригодность покрытий AlN и TiN для управления напряженным состоянием ПС Si_3N_4 -TiC-керамики при комбинированном нагружении для разработки рекомендаций по формированию состава и структуры функционального ПС на деталях и режущих инструментах из Si_3N_4 -TiC-керамики. Настоящая статья является продолжением предыдущих статей [29, 30].

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численные эксперименты выполнены в автоматизированной системе термочисленных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы и метода контрольных точек (КТ) [29, 31]. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i в ПС Si_3N_4 -TiC-керамики двух систем. Первая система: Si_3N_4 (3 — зерно радиусом 3 мкм) — Y_2O_3 (МФ — межзеренная фаза толщиной 0,06 мкм) — Si_3N_4 (М — матрица), вторая система: TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 . На поверхности Si_3N_4 -TiC-керамики этих систем присутствовало покрытие AlN и TiN толщиной 2 мкм [29, 30]. ПС нагружали комбинированной нагрузкой, состоящей из сосредоточенной силы $F = 0,02$ Н,



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

$\beta = 45^\circ$, распределенной силы $P = 5 \cdot 10^8$ Па и теплового потока $Q = 9 \cdot 10^8$ Вт/м²; коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $h = 1 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град).

ПС Si_3N_4 -TiC-керамики с покрытием сформирован поверхностями структурных элементов: поверхностью зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C1 — KT1–KT18); поверхностью межзеренной фазы, примыкающей к зерну (C2 — KT19–KT34); поверхностью межзеренной фазы, примыкающей к матрице (C3 — KT35–KT50); поверхностью матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (C4 — KT51–KT66); поверхностями зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающими к слою покрытия (C5 — KT67–KT82), и поверхностью слоя покрытия, примыкающей к зерну, межзеренной фазе и матрице (C6 — KT83–KT98).

Для анализа деформации ПС оценивали горизонтальные u и вертикальные v перемещения KT99, KT100 и KT101, которые располагались в поверхностях C6, C5 и C4. По результатам расчетов определяли статистические характеристики для σ_i : наименьшие $\sigma_{\min}$, наибольшие $\sigma_{\max}$ и средние $\sigma_{\text{ср}}$, $\Delta\sigma_i$ — диапазон изменения σ_i , медиану M_e для σ_i , стандартное отклонение s для σ_i в каждой поверхности. Значимость покрытий AlN и TiN для контролируемой трансформации напряженного состояния ПС Si_3N_4 -TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки оценивали коэффициентами K_1 – K_6 , которые относятся к статистическим характеристикам $\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$, $\Delta\sigma_i$, M_e , $\sigma_{\text{ср}}$ и s соответственно. Порядок расчета коэффициентов K_1 – K_6 приведен в статье [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схема деформации ПС Si_3N_4 -TiC-керамики с покрытием под действием комбинированной на-

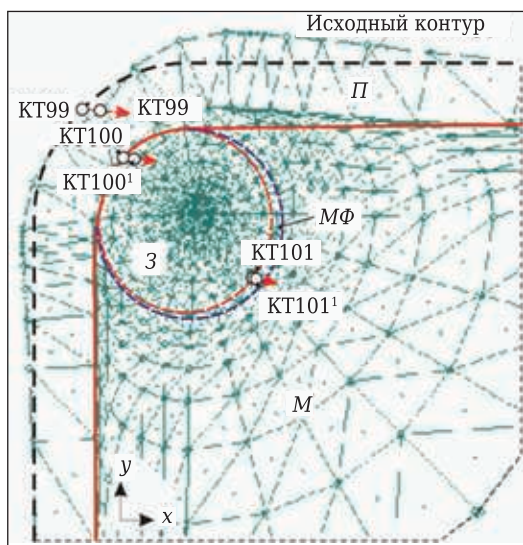


Рис. 1. Схема деформации ПС керамики системы Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием AlN под действием комбинированной нагрузки

грузки, типичная для обеих систем и покрытий, показана на рис. 1. Видно, что точка приложения сосредоточенной силы KT99 вдавливается с наибольшим перемещением относительно исходного контура и перемещается по стрелке в KT99¹. Причем горизонтальные перемещения являются преобладающими. По мере удаления от точки приложения сосредоточенной силы значения перемещений уменьшаются, а траектория перемещений практически не изменяется. Точка KT100 перемещается в KT100¹, а точка KT101 имеет наименьшие перемещения, как наиболее удаленная от точки приложения сосредоточенной силы. Результаты расчетов u и v KT99–KT101 для керамики разных систем и с покрытиями различаются. Степень деформации ПС керамики системы TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 ниже, чем у керамики системы Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 .

Установлено, что в ПС керамики системы Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием AlN значения u и v при перемещении KT99 в положение KT99¹ составляют 0,022 и -0,0099 мкм, при перемещении KT100 в положение KT100¹ 0,018 и -0,0054 мкм, при перемещении KT101 в положение KT101¹ 0,0066 и -0,0025 мкм соответственно. В ПС керамики той же системы с покрытием TiN значения u и v при аналогичных перемещениях составляют 0,015 и -0,0047 мкм, 0,014 и -0,0047 мкм, 0,0061 и -0,0024 мкм соответственно.

В ПС керамики системы TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием AlN значения u и v при аналогичных перемещениях составляют 0,013 и -0,0012 мкм, 0,0065 и 0,0041 мкм, 0,0075 и -0,0038 мкм соответственно. В ПС керамики той же системы с покрытием TiN значения u и v при аналогичных перемещениях составляют 0,0097 и 0,0004 мкм, 0,0064 и 0,0013 мкм, 0,0071 и -0,0037 мкм соответственно.

Установлено, что поля σ_i , сформировавшиеся в ПС керамики систем Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 и TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытиями AlN и TiN под действием комбинированной нагрузки, характеризуются наибольшими значениями в малых локальных объемах покрытия, границы керамика-покрытие и зерна керамики. В качестве примера на рис. 2 показано поле σ_i в ПС керамики системы TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием AlN. Наибольшие значения σ_i (1389 МПа) фиксируются в области покрытия между KT99 и KT100, на границе и в локальном объеме левого верхнего сектора зерна.

Характер изменения σ_i в поверхностях C1–C6 ПС керамики системы Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытиями AlN и TiN под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3. Видно, что во всех поверхностях покрытие не оказывает значимого влияния на форму кривых, но изменяет значения σ_i . Следует отметить отсутствие существенных различий форм кривых для поверхностей C1–C4. Кривые для этих поверхностей ха-

характеризуются одинаковым расположением КТ с минимальными и максимальными значениями σ_i (см. рис. 3, а–е). Наименьшие значения σ_i в поверхностях C1–C4 фиксировали в центральной части кривых, наибольшие значения σ_i — на левом периферийном участке. Для поверхности C5 изменения σ_i описываются кривыми ломаной формы с наибольшими (пиковыми) значениями σ_i в центральной части (см. рис. 3, д). Для поверхности C6 изменения σ_i описываются кривыми ломаной формы с наибольшими значениями σ_i в центральной и правой периферийной части (см. рис. 3, е).

В поверхности C1 наименьшие σ_i фиксируются в КТ12 и КТ10, а наибольшие — в КТ2 (см. рис. 3, а), в поверхности C2 наименьшие σ_i фиксируются в КТ26, а наибольшие — в КТ19 (см. рис. 3, б), в поверхности C3 наименьшие σ_i фиксируются в КТ44, а наибольшие — в КТ35 (см. рис. 3, в), в поверхности C4 наименьшие σ_i фиксируются в КТ61 и КТ62, а наибольшие — в

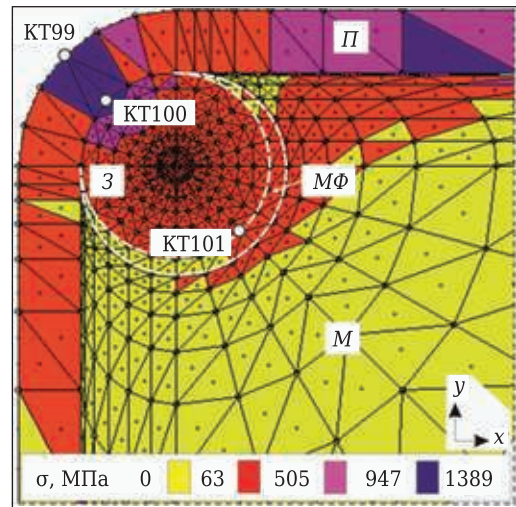


Рис. 2. Поле σ_i в ПС керамики системы $\text{TiC}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытием AlN под действием комбинированной нагрузки

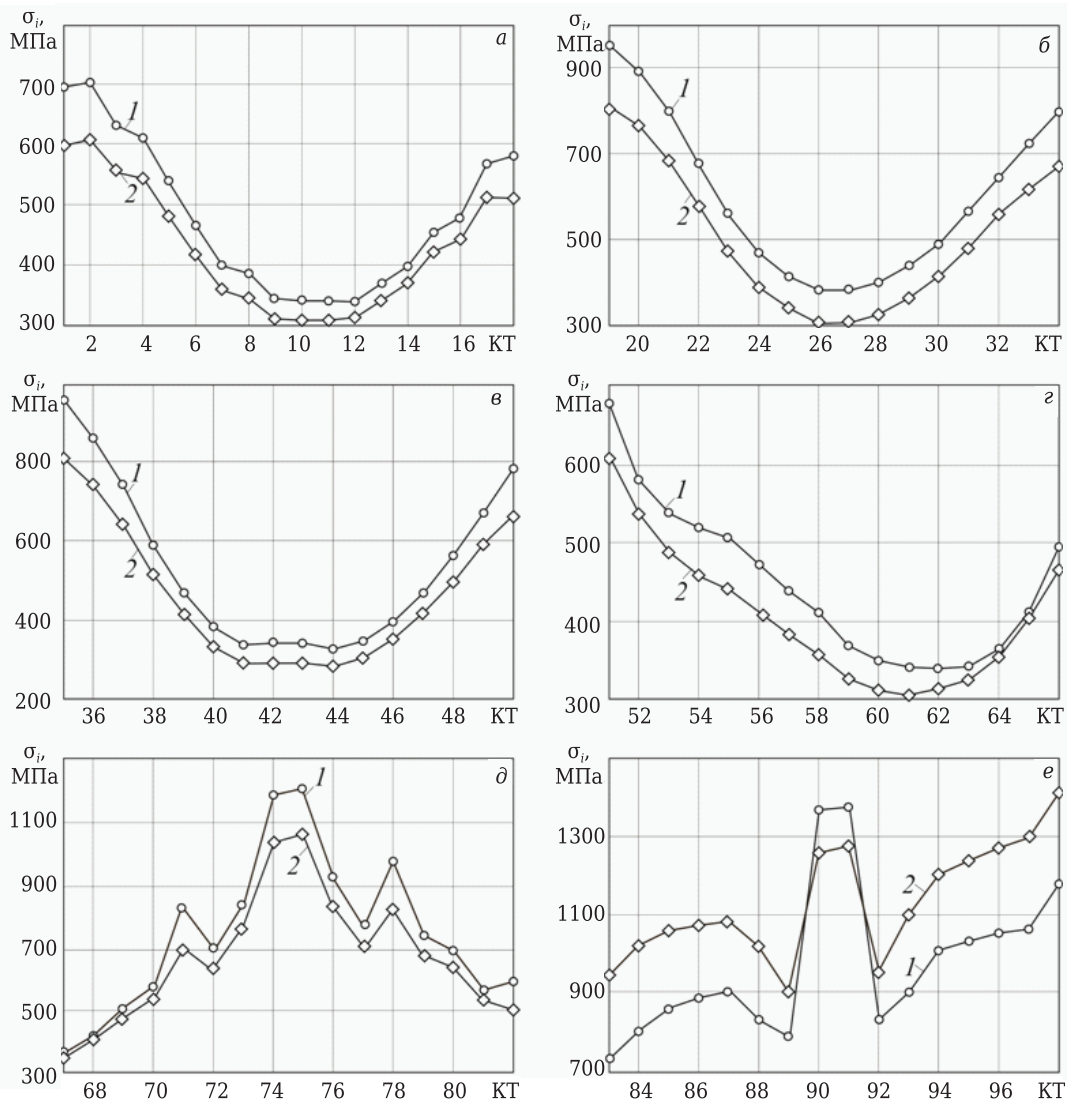


Рис. 3. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытием AlN (1) и TiN (2) под действием комбинированной нагрузки

Таблица 1. Статистические характеристики ПС керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4$ с покрытием AlN / TiN*

Поверхность	$\sigma_{\text{мин}}$, МПа	$\sigma_{\text{макс}}$, МПа	$\Delta\sigma_i$, МПа	M_e , МПа	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	s
C1	349/314	701/612	352/298	466,5/424,5	484,8/434,2	121,7/103,5
C2	379/312	950/797	571/485	557/478,5	597,1/505	188,2/160,5
C3	328/284	958/810	630/526	475/420	538,8/466,8	208,2/176,8
C4	344/305	676/613	332/308	426/392	448,3/404,9	98,4/90,5
C5	379/350	1202/1052	823/705	719/648	747,5/662,3	241,2/201,5
C6	743/906	1379/1405	636/499	914,5/1090,5	985,2/1129,5	192,1/145,8

* В числителе — для керамики с покрытием AlN, в знаменателе — для керамики с покрытием TiN.

КТ51 (см. рис. 3, з), в поверхности C5 наименьшие σ_i фиксируются в КТ67, а наибольшие — в КТ75 (см. рис. 3, д), в поверхности C6 наименьшие значения σ_i фиксируются в КТ83 и КТ89, а наибольшие — в КТ91 и КТ98 (см. рис. 3, е).

Значения статистических характеристик для σ_i в поверхностях C1–C6 ПС керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4$ с покрытиями AlN и TiN под действием комбинированной нагрузки приведены в табл. 1. Наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ зафиксированы в поверхности C6 с покрытием TiN, наи-

меньшие — в поверхности C4 с покрытием TiN, причем наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ превосходят наименьшие в 2,8 раза. Наибольшие значения s зафиксированы в поверхности C5 с покрытием AlN, наименьшие — в поверхности C4 с покрытием TiN, причем наибольшие значения s превосходят наименьшие в 2,7 раза.

Характер изменения σ_i в поверхностях C1–C6 ПС керамики системы $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4$ с покрытиями AlN и TiN под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 4. Видно, что во всех

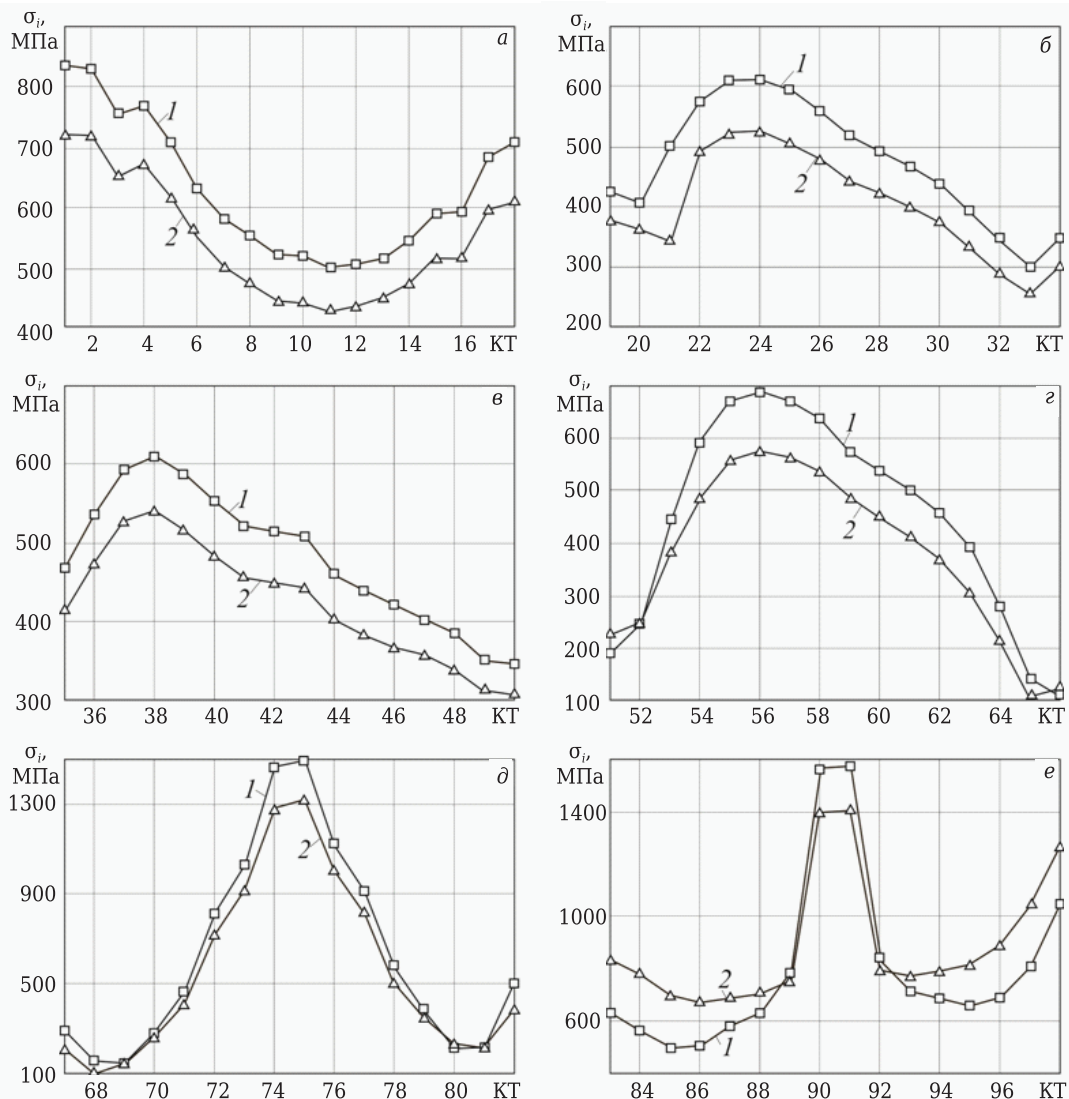


Рис. 4. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) керамики системы $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4$ с покрытием AlN (1) и TiN (2) под действием комбинированной нагрузки

Таблица 2. Статистические характеристики ПС керамики системы $\text{TiC}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытием AlN / TiN *

Поверхность	$\sigma_{\text{мин}}$, МПа	$\sigma_{\text{макс}}$, МПа	$\Delta\sigma_i$, МПа	M_e , МПа	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	s
C1	504/432	837/725	333/293	595,5/521	633,8/550,1	112,3/99,8
C2	305/261	610/525	305/264	481/390,5	474,4/403,4	98,5/85,4
C3	350/310	616/538	266/228	492,5/429	486,8/425,1	85,7/72,8
C4	108/109	692/576	584/467	485,5/397	449,3/378,1	198,8/157,6
C5	149/104	1495/1316	1346/1212	488/399	631,1/554,3	455,9/403,3
C6	498/680	1582/1418	1084/738	688/801,5	799,5/902,4	334,5/249,1

* В числителе — для керамики с покрытием AlN , в знаменателе — для керамики с покрытием TiN .

Таблица 3. Коэффициент значимости покрытий AlN и TiN ПС керамики $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{TiC}$ *

Коэффициент значимости	C1	C2	C3	C4	C5	C6
K_1	1,11/1,17	1,21/1,17	1,15/1,13	1,13/1,00	1,08/1,40	0,82/0,73
K_2	1,15/1,15	1,19/1,16	1,18/1,14	1,10/1,20	1,14/1,11	0,98/1,16
K_3	1,18/1,14	1,17/1,16	1,20/1,17	1,07/1,25	1,17/1,11	1,27/1,47
K_4	1,10/1,14	1,20/1,23	1,13/1,15	1,21/1,22	1,11/1,22	0,84/0,85
K_5	1,12/1,15	1,18/1,18	1,15/1,15	1,11/1,19	1,13/1,14	0,87/0,89
K_6	1,18/1,13	1,17/1,15	1,18/1,18	1,09/1,26	1,20/1,13	1,31/1,34

* В числителе — для керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$, в знаменателе — для керамики системы $\text{TiC}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$.

поверхностях покрытие не оказывает значимого влияния на форму кривых, но изменяет значения σ_i . Следует отметить идентичность форм кривых для поверхностей C2–C4 (см. рис. 4, б–г). Кривые для этих поверхностей характеризуются одинаковым расположением КТ с минимальными и максимальными значениями σ_i . Наибольшие значения σ_i в поверхностях C2–C4 смещены влево от центральной части кривых, наименьшие значения σ_i сосредоточены на правом периферийном участке. Для поверхности C1 изменения σ_i описываются кривыми простой сглаженной формы (см. рис. 3, а) с наибольшими значениями σ_i на левом периферийном участке и наименьшими в центральной части кривых. Для поверхностей C5 и C6 изменения σ_i описываются кривыми ломаной формы с наибольшими значениями σ_i в центральной части кривых (см. рис. 3, д, е).

В поверхности C1 наименьшие σ_i фиксируются в КТ11, а наибольшие — в КТ1 (см. рис. 4, а), в поверхности C2 наименьшие σ_i фиксируются в КТ33, а наибольшие — в КТ24 (см. рис. 4, б), в поверхности C3 наименьшие σ_i фиксируются в КТ50, а наибольшие — в КТ38 (см. рис. 4, в), в поверхности C4 наименьшие σ_i фиксируются в КТ66 и КТ65, а наибольшие — в КТ56 (см. рис. 4, г), в поверхности C5 наименьшие σ_i фиксируются в КТ68 и КТ69, а наибольшие — в КТ75 (см. рис. 4, д), в поверхности C6 наименьшие значения σ_i фиксируются в КТ85 и КТ86, а наибольшие — в КТ91 (см. рис. 4, е). По аналогии с керамикой системы $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ в поверхностях C5 и C6 ПС керамики системы $\text{TiC}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытиями AlN и TiN отмечено наличие пиковых значений σ_i .

Значения статистических характеристик для σ_i в поверхностях C1–C6 ПС керамики системы $\text{TiC}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытиями AlN и TiN под действием комбинированной нагрузки

приведены в табл. 2. Наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ зафиксированы в поверхности C6 с покрытием TiN , наименьшие — в поверхности C4 с покрытием TiN , причем наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ превосходят наименьшие в 2,4 раза. Наибольшие значения s зафиксированы в поверхности C5 с покрытием AlN , наименьшие — в поверхности C3 с покрытием TiN , причем наибольшие значения s превосходят наименьшие в 6,2 раза.

Коэффициенты значимости покрытий AlN и TiN для контролируемой трансформации напряженного состояния ПС $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{TiC}$ -керамики в условиях комбинированного нагружения приведены в табл. 3. Видно, что покрытие TiN оказывает более благоприятное влияние на напряженное состояние ПС керамики двух систем, чем покрытие AlN , о чем свидетельствуют значения $K_1-K_6 > 1$ для поверхностей C1–C5. Однако на границе между покрытием AlN и керамикой (поверхность C6) коэффициенты значимости отдельных показателей неоднородности напряжений $\sigma_{\text{мин}}$, $\sigma_{\text{макс}}$, M_e и $\sigma_{\text{ср}}$ свидетельствуют в пользу покрытия AlN .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных экспериментов определены особенности влияния покрытий AlN и TiN на напряженное состояние ПС нитридной керамики под действием комбинированной нагрузки. По критерию наименьших перемещений КТ99–КТ101 при деформации, вызванной комбинированной нагрузкой, покрытие TiN оказывает более благоприятное влияние, чем покрытие AlN . Наименьшие значения u и v зафиксированы в керамике системы $\text{TiC}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытием TiN , а наибольшие — в ПС керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$ с покрытием AlN . Покрытия AlN и TiN по-разному

влияют на напряженное состояние ПС Si_3N_4 -TiC-керамики в условиях комбинированного нагружения, причем коэффициенты значимости покрытий зависят также от системы керамики и поверхности.

В поверхности C1 наименьшие значения статистических показателей $\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$, M_e и $\sigma_{\text{ср}}$ зафиксированы в керамике системы Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием TiN, а $\Delta\sigma_i$ и s — в керамике системы TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием TiN. В поверхности C2 наименьшие значения показателей $\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$, $\Delta\sigma_i$, M_e , $\sigma_{\text{ср}}$ и s зафиксированы в керамике системы TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием TiN. В поверхности C3 наименьшие значения показателей $\sigma_{\min}$ и M_e зафиксированы

в керамике системы Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием TiN, а показателей $\sigma_{\max}$, $\Delta\sigma_i$, $\sigma_{\text{ср}}$ и s — в керамике системы TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием TiN. В поверхностях C4 и C5 распределение наименьших статистических показателей между системами Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 и TiC- Y_2O_3 - Si_3N_4 с покрытием TiN примерно одинаково. В поверхности C6 распределение статистических показателей по системам керамики и покрытиям неоднозначно.

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

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. **Bocanegra-Bernal, M. H.** Dense and near-net-shape fabrication of Si_3N_4 ceramics / M. H. Bocanegra-Bernal, B. Matovic // Mater. Sci. Eng.: A. — 2009. — Vol. 500, № 1/2. — P. 130–149.
3. **Duan, Yusen.** Cost effective preparation of Si_3N_4 ceramics with improved thermal conductivity and mechanical properties / Yusen Duan, Ning Liu, Jingxian Zhang, Hui Zhang [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2020. — Vol. 40, № 4. — P. 298–304.
4. **Santos, C.** Compressive creep behavior of hot-pressed Si_3N_4 ceramics using alumina and a rare earth solid solution as additives / C. Santos, K. Strecker, M. J. R. Barboza [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2005. — Vol. 23, № 3. — P. 183–192.
5. **Zhu, Xinwen.** Effects of processing method and additive composition on microstructure and thermal conductivity of Si_3N_4 ceramics / Xinwen Zhu, You Zhou, Kiyosh Hirao // J. Eur. Ceram. Soc. — 2006. — Vol. 26, № 4/5. — P. 711–718.
6. **Tian, Chunyan.** Thermal shock behavior of Si_3N_4 -TiN nanocomposites / Chunyan Tian, Hai Jiang, Ning Liu // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2011. — Vol. 29, № 1. — P. 14–20.
7. **Miyazaki, Hiroyuki.** Correlation of wear behavior and indentation fracture resistance in silicon nitride ceramics hot-pressed with alumina and yttria // Hiroyuki Miyazaki, Hideki Hyuga, Yu-ichi Yoshizawa [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2009. — Vol. 29, № 8. — P. 1535–1542.
8. **Liu, Xue-Jian.** Microstructure and mechanical properties of silicon nitride ceramics prepared by pressureless sintering with $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ as sintering additive / Xue-Jian Liu, Zhi-Yong Huang, Qi-Ming Ge [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2005. — Vol. 25, № 14. — P. 3353–3359.
9. **Calis Acikbas, N.** Influence of β - Si_3N_4 particle size and heat treatment on microstructural evolution of α : β -SiAlON ceramics / N. Calis Acikbas, R. Kumar, F. Kara [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2011. — Vol. 31, № 3. — P. 629–635.
10. **Hampshire, Stuart.** Silicon nitride-silicon carbide micro/nano-composites — a review / Stuart Hampshire, Triona Kennedy // Int. J. Appl. Ceram. Technol. — 2021. — Vol. 19, № 2. — P. 1107–1125.
11. **Balog, M.** Nano/macro-hardness and fracture resistance of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ composites with up to 13 wt. % of SiC nano-particles / M. Balog, J. Keckéš, T. Schöberl [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2006. — Vol. 27, № 5. — P. 2145–2152.
12. **Yongming, Luo.** In situ preparation of Si_3N_4 -TiN composite by pyrolysis of polytitanosilazane (PTSZ) / Luo Yongming, Zheng Zhimin, Xu Caihong, Mei Xuening // Ceram. Int. — 2009. — Vol. 35, № 3. — P. 1301–1303.
13. **Maros, B. Maria.** Tribological characterisation of silicon nitride/multilayer graphene nanocomposites produced by HIP and SPS technology / Maria B. Maros, Alexandra K. Németh, Zoltán Károly [et al.] // Tribology International. — 2016. — Vol. 93, Part A. — P. 269–281.
14. **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, № 1. — P. 78–81.
15. **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.
16. **Kuzin, V. V.** Production process planning for preparing Si_3N_4 -ceramic objects taking account of edge defectiveness / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 5. — P. 562–565.
17. **Кузин, В. В.** Проектирование технологических процессов изготовления деталей из Si_3N_4 -керамики с учетом требуемой дефектности кромок / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 65–68.
18. **Shukla, P. P.** Examination of temperature distribution and the thermal effects on Si_3N_4 engineering ceramics during fibre laser surface treatment / P. P. Shukla, J. Lawrence // Optics and Lasers in Engineering. — 2011. — Vol. 49, № 7. — P. 998–1011.
19. **Xing, Youqiang.** Synergistic effect of surface textures and DLC coatings for enhancing friction and wear performances of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ ceramic / Youqiang Xing, Xingsheng Wang, Zhonghua Du [et al.] // Ceram. Int. — 2020. — Vol. 48, № 1. — P. 514–524.

18. **Kim, Young-Gu.** Effect of the microstructure of Si_3N_4 on the adhesion strength of TiN film on Si_3N_4 / *Young-Gu Kim, Junichi Tatami, Katsutoshi Komeya* [et al.] // *Thin Solid Films*. — 2006. — Vol. 510, № 1/2. — P. 222–228.
19. **Liu, Wei.** PVD-CrAlN and TiAlN coated Si_3N_4 ceramic cutting tools - 1. Microstructure, turning performance and wear mechanism / *Wei Liu, Quanquan Chu, Junjie Zeng* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2017. — Vol. 43, № 12. — P. 8999–9004.
20. **Pakula, D.** Structure and properties of multicomponent coatings deposited onto sialon tool ceramics / *D. Pakula* // *Archives of Materials Science and Engineering*. — 2011. — Vol. 52, № 1. — P. 54–60.
21. **Peng, Zhijian.** Hard and wear-resistant titanium nitride films for ceramic cutting tools by pulsed high energy density plasma / *Zhijian Peng, Hezhao Miao, Wei Wang* [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. — 2003. — Vol. 166, № 2/3. — P. 183–188.
22. **Jin, Z. H.** Thermal shock residual strength of functionally graded ceramics / *Z. H. Jin, W. J. Luo* // *Mater. Sci. Eng.: A*. — 2006. — Vol. 435/436, № 4/5. — P. 71–77.
23. **Ševeček, Oldřich.** Assessment of crack-related problems in layered ceramics using the finite fracture mechanics and coupled stress-energy criterion / *Oldřich Ševeček, Michal Kotoul, Dominique Leguillon* [et al.] // *Procedia Structural Integrity*. — 2016. — Vol. 2. — P. 2014–2021.
24. **Xikun, Li.** Composition, characteristics and development of advanced ceramic cutting tools / *Li Xikun, Liu Jing, Qiu Like* [et al.] // *Journal of Rare Earths*. — 2007. — Vol. 25, supplement 2. — P. 287–294.
25. **Blugan, Gurdial.** Si_3N_4 -TiN-SiC three particle phase composites for wear applications / *Gurdial Blugan, Mousab Hadad, Thomas Graule* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2014. — Vol. 40, № 1. Part B. — P. 1439–1446.
26. **Wang, Tianpeng.** Numerical analysis on the residual stress distribution and its influence factor analysis for $\text{Si}_3\text{N}_4/42\text{CrMo}$ brazed joint / *Tianpeng Wang, Jie Zhang, Wook Jin Lee* [et al.] // *Simulation Modelling Practice and Theory*. — 2019. — Vol. 95. — P. 49–59.
27. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / *S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton* [et al.] // *Proceedings of the 37th International MATADOR Conference*. — 2013. — P. 181–184.
28. **Kuzin, V. V.** Basic framework for computer-aided engineering of polished ceramic surface layers / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2020. — Vol. 61, № 3. — P. 349–354.
- Кузин, В. В.** Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // *Новые огнеупоры*. — 2020. — № 6. — С. 64–69.
29. **Кузин, В. В.** Значимость покрытий AlN и TiN для контролируемой трансформации напряженного состояния поверхностного слоя Si_3N_4 -TiC-керамики в условиях силового нагружения / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2022. — № 3. — С. 62–68.
30. **Кузин, В. В.** Влияние покрытий AlN и TiN на тепловое и напряженное состояние поверхностного слоя Si_3N_4 -TiC-керамики в условиях теплового потока / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров* [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2022. — № 4. — С. 57–63.
31. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / *V. Kuzin, S. Grigoriev* // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 31.05.22

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. Ю. Федоров, М. А. Волосова, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Found-ex 2022 — международная выставка литейной промышленности



www.bvv.cz/fond-ex/

3–7 октября 2022 г.

Чехия, г. Брно, Brno Exhibition Centre

ТЕМАТИКА:

- Металлообработка: технологии, оборудование и комплектующие
- Промышленные технологии
- Оборудование плавильных установок
- Огнеупорные материалы
- Технические газы для литейной промышленности
- Материалы для формовки и основные смеси
- Литейные плавильные печи
- Литейные машины и оборудование
- Оборудование и аксессуары для финишной обработки отливок
- Оборудование и материалы для сварки, резки и ремонта отливок
- Оборудование и материалы для обработки отливок
- Кондиционирование для литейных цехов
- Транспортное и складское оборудование для литейной промышленности
- Технология контроля и регулирования для литейной промышленности
- Компьютерное оборудование, управление, расчеты, моделирование
- Защита окружающей среды и удаление отходов в литейной промышленности