Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**, к. т. н. **М. А. Волосова**

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕОДНОРОДНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ МЕЖДУ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКОЙ И TiC-ПОКРЫТИЕМ

На основе выполненных численных экспериментов установлены основные закономерности влияния параметров силового воздействия на неоднородность напряжений на границе между нитридной керамикой и TiC-покрытием. Выявлена взаимосвязь химического состава зерна керамики с неоднородностью напряжения на границе под действием разных силовых нагрузок.

Ключевые слова: *нитридная керамика, TiC-покрытие, граница, приграничный слой, напряженное состояние, неоднородность напряжений.*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ микронапряжений, возникающих под действием эксплуатационных нагрузок, имеет особую значимость при создании новых керамических материалов и проектировании изделий из них [1]. Для изделий с функциональными покрытиями дополнительное значение приобретают закономерности распределения микронапряжений в поверхностном слое керамики, на границе между керамикой и покрытием, а также разными слоями покрытия [2–4]. Оценка напряженного состояния этих очень узких областей композиционного материала позволяет оценить вероятность локального разрушения керамических изделий по трудно прогнозируемому механизму отслоения тонких пленок в условиях высоконагруженного контактного взаимодействия [5–7].

Экспериментально этот эффект выявлен и исследован на инструментах из нитридной керамики с разными покрытиями в работе [8]. Однако выявить первопричины зарождения трещин на границе «нитридная керамика – покрытие» в этом исследовании не удалось. При этом стала очевидной взаимосвязь напряженного состояния границы «керамика – покрытие» с локальным разрушением поверхности керамических изделий при эксплуатации, а также необходимость решения этой задачи с использованием метода микроструктурного моделирования деформационных процессов в спеченном структурно-неоднородном материале [9].

Впервые изменение напряженно-деформированного (НД) состояния поверхностного слоя нитридной керамики за счет нанесения покрытия рассмотрено в работе [10]. Было выявлено влияние разных свойств покрытия на НД-состояние режущих пластин из нитридной керамики, что позволило сделать вывод о возможности управления напряженным состоянием их поверхностного слоя путем изменения свойств покрытия. В [11–14] было детально изучено влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике при разных внешних воздействиях. Для керамики на основе нитрида кремния обнаружена трансформация ее поверхностном слоя при изменении толщины TiC-покрытия [15–18]. Закономерности изменения межслойных напряжений в TiC/TiN-покрытии, нанесенном на нитридную керамику, под действием эксплуатационных нагрузок детально изучено в работах [19, 20]. С использованием разработанной методики численных экспериментов установлены основные закономерности формирования напряжений в приграничных слоях между нитридной керамикой и покрытием из нитрида титана под действием силовой и тепловой нагрузки [21, 22]. Для композиции «нитридная керамика — TiC-покрытие» аналогичные закономерности отсутствуют. В работе поставлена цель — исследовать влияние разных силовых нагрузок на неоднородность напряжений, образующихся на границе между нитридной керамикой и TiC-покрытием.

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение напряженного состояния границы между нитридной керамикой и TiC-покрытием толщиной 5 мкм выполнено по методике и с использованием расчетных схем, приведенных в [21]. Проведены две серии численных экспе-

риментов, в которых исследованы две системы керамики на основе нитрида кремния: система № 1 — Si_3N_4 (зерно) – Y_2O_3 (межзеренная фаза) – Si_3N_4 (матрица); система № 2 — TiC (зерно) – Y_2O_3 (межзеренная фаза) – Si_3N_4 (матрица). В первой серии к свободной поверхности конструкции прикладывали сосредоточенную силу F = 0,1 Н под углом 45°. Во второй серии конструкцию нагружали распределенной силой $P = 4{,}0 \cdot 10^8$ Па. Контрольные точки (КТ), выделенные по методике [23], были симметрично расположены в контактирующих подслоях керамики (ПСК) — КТ1–КТ20 и TiC-покрытия (ПСП) — КТ21–КТ40 (рис. 1). Численные эксперименты выполнены с использованием автоматизированной системы термопрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [24], созданной на основе математической модели НД состояния керамической пластины [24].

Для оценки неоднородности напряжений в ПСК и ПСП использовали следующие характеристики: наибольшее $\sigma_{макс}$, наименьшее $\sigma_{мин}$, среднее $\sigma_{ср}$ значения; диапазон изменения Σ; стандартное отклонение s и число N изменения знака нормальных (σ_{11}, σ_{22}) и касательных (σ_{12}) напряжений, а также интенсивности напряжений σ_i; ($\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 4\sigma_{12}^2}$) в выборке из 20 КТ. Напряженное состояние границы керамика – покрытие определяли характеристиками $\sigma_{макс}^{гр}$, $\sigma_{мин}^{гр}$, $\sigma_{ср}^{гр}$, $\Sigma^{гр}$ и $s^{гр}$, рассчитанными как среднее арифметическое $\sigma_{макс}$, $\sigma_{мин}$, $\sigma_{ср}$, Σ и s значений интенсивности напряжений σ_i в ПСК и ПСП.

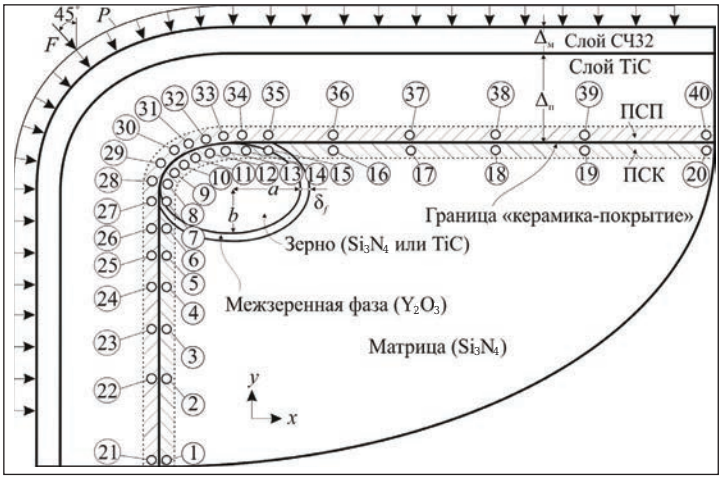

Рис. 1. Расчетная схема и расположение КТ

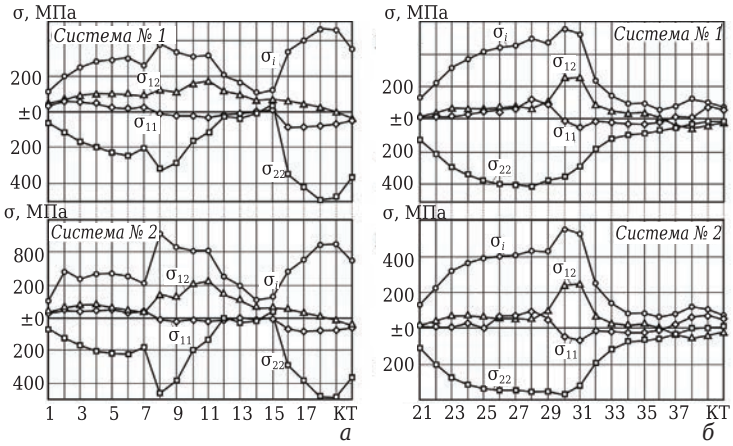

Рис. 2. Напряжения в ПСК (*а*) и ПСП (*б*) под действием сосредоточенной силы

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием сосредоточенной силы показаны на рис. 2. Кривые, характеризующие изменение напряжений в ПСК двух систем имеют достаточно сложный вид, что свидетельствует о высокой структурной неоднородности напряжений в этом пограничном слое. Напряженное состояние ПСК двух систем определяют кривые σ_{22} и σ_i, имеющие максимумы в КТ8 и КТ18, и кривые σ_{11} и σ_{12} с максимумами в КТ16 и КТ11 (система № 1) и КТ18 и КТ11 (система № 2). Кривые, характеризующие изменение напряжений в ПСП, имеют более простой вид и характеризуются одним максимумом в КТ28 (σ_{11} и σ_{22}), КТ31 (σ_{12}), КТ30 (σ_i) (система № 1) и КТ28 (σ_{11}), КТ31 (σ_{12}), КТ30 (σ_{22} и σ_i) (система № 2). Формы кривых σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i для аналогичных приграничных слоев разных систем имеют практически идентичный вид.

Особенностью напряжений, сформировавшихся под действием сосредоточенной силы, являются разные знаки напряжений в симметрично расположенных КТ приграничных слоев керамики и покрытия. Например, напряжения σ_{11} на участке КТ17–КТ20 ПСК обеих систем являются сжимающими, на участке КТ37–КТ40 ПСП — растягивающими; на участке КТ8–КТ9 ПСК — сжимающими, на участке КТ28–КТ29 ПСП — растягивающими. Напряжения σ_{12} на участке КТ17–КТ18 ПСК системы № 1 являются растягивающими, на участке КТ37–КТ38 ПСП — сжимающими.

Детально проанализировано влияние материала зерна на значения σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i в ПСК и ПСП, сформировавшиеся под действием сосредоточенной силы F = 0,1 Н, приложенной под углом 45°. В ПСК системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 144 МПа от 49 (КТ2) до –95 МПа (КТ16) при $\sigma_{ср}$ = –19 МПа, стандартном отклонении s = 45 МПа и числе изменений знака N = 1 (см. рис. 2, *а*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 532 МПа от 31 (КТ15) до –495 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср}$ = –215 МПа, s = 158 МПа и N = 2.

Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 206 МПа от 166 (КТ11) до –40 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = = 76 МПа, s = 49 МПа и N = 1. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 355 МПа от 105 (КТ14) до 460 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср}$ = 278 МПа и s = 106 МПа.

В ПСК системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 131 МПа от 50 (КТ5) до –81 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср}$ = –8 МПа, s = 45 МПа и N = 3 (см. рис. 2, *а*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 519 МПа от 35 (КТ15) до –484 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср}$ = –216 МПа, s = 165 МПа и N = = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 271 МПа от 230 (КТ11) до –41 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = = 80 МПа, s = 67 МПа и N = 1. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 406 МПа от 110 (КТ14) до 516 МПа (КТ8) при $\sigma_{ср}$ = 299 МПа и s = 120 МПа.

В ПСП системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 173 МПа от 116 (КТ28) до –57 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср}$ = 17 МПа, s = 47 МПа и N = 2 (см. рис. 2, *б*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 397 МПа от –7 (КТ40) до –404 МПа (КТ28) при $\sigma_{ср}$ = –205 МПа, s = 148 МПа и N = = 0. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 312 МПа от 259 (КТ31) до –53 МПа (КТ38) при $\sigma_{ср}$ = = 59 МПа, s = 81 МПа и N = 1. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 487 МПа от 63 (КТ36) до 550 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср}$ = 257 МПа и s = 176 МПа.

В ПСП системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 165 МПа от 97 (КТ28) до –68 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср}$ = 18 МПа, s = 44 МПа и N = 2 (см. рис. 2, *б*). Диапазон изменения напряжений σ_{22} составляет 369 МПа от –7 (КТ40) до –376 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср}$ = –202 МПа, s = 142 МПа и N = 0. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 301 МПа от 249 (КТ31) до –52 МПа (КТ38) при $\sigma_{ср}$ = 51 МПа, s = 78 МПа и N = 1. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 486 МПа от 62 (КТ36) до 548 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср}$ = 254 МПа и s = 167 МПа.

Обобщенные показатели структурной неоднородности напряжений в ПСК и ПСП, а также характеристики напряженного состояния границы между керамикой на основе нитрида кремния и покрытием из карбида титана (системы № 1 и 2) под действием сосредоточенной силы F = 0,1 Н, приложенной под углом 45°, приведены в табл. 1.

Анализ табличных данных показывает, что значения основных показателей неоднородности напряжений σ_{11}, σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i (кроме $\sigma_{ср}$) в ПСП выше, а напряжений σ_{22} ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПСК. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2. В ПСП системы № 1 значение s для σ_i в 1,7 раза больше, чем в ПСК, для системы № 2 эта разница составляет 1,4 раза.

Установлено, что значения $\sigma^{гр}_{макс}$, $\sigma^{гр}_{ср}$ и $\Sigma^{гр}$ для σ_i, характеризующие напряженное состояние границы «керамика – покрытие» в системе № 2, превосходят аналогичные характеристики системы № 1 на 5, 3 и 6 % соответственно. Значения $\sigma^{гр}_{мин}$ и $s^{гр}$ в обеих системах практически совпадают. Этот факт позволяет предположить, что вероятность появления дефектов под действием сосредоточенной силы на участках контакта зерен Si_3N_4 с покрытием TiC меньше по сравнению с вероятностью зарождения дефектов на границе «зерно TiC – покрытие TiC».

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием распределенной силы P = = $4{,}0 \cdot 10^8$ Па показаны на рис. 3. Видно, что в ПСК системы № 1 кривые σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i имеют более сглаженный вид по сравнению с системой № 2. В ПСП обеих систем напряжения описываются практически идентичными по виду кривыми, и их основное различие заключается в неодинаковых значениях σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i. В ПСК системы № 1 на участке КТ5–КТ10 напряжения σ_{11} являются сжимающими, а в ПСП на участке КТ25–КТ30 эти напряжения растягивающие; напряжения

Таблица 1

Показатели	σ_{11}		σ_{22}		σ_{12}		σ_i		Граница
	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	
Система № 1									
Σ	144	173	532	397	206	312	355	487	421
$\sigma_{макс}$	–95	116	–495	–404	166	259	460	550	505
$\sigma_{мин}$	49	–57	31	–7	–40	–53	105	63	84
$\sigma_{ср}$	–19	17	–215	–205	76	59	278	257	267,5
N	1	2	2	0	1	1	–	–	–
s	45	47	158	148	49	81	106	176	141
Система № 2									
Σ	131	165	519	369	271	301	406	486	446
$\sigma_{макс}$	–81	97	–484	–376	230	249	516	548	532
$\sigma_{мин}$	50	–68	35	–7	–41	–52	110	62	86
$\sigma_{ср}$	–8	18	–216	–202	80	51	299	254	276,5
N	3	2	2	0	1	1	–	–	–
s	45	44	165	142	67	78	120	167	143,5

σ_{22} в ПСК системы № 1 на участке КТ11–КТ13 сжимающие, в ПСП на участке КТ31–КТ33 растягивающие. В пограничных слоях системы № 2 аналогичные «неблагоприятные» участки не выявлены.

Установлено влияние химического состава зерна на значения σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i в ПСК и ПСП под действием распределенной силы $P = 4{,}0 \cdot 10^8$ Па. В ПСК системы № 1 (см. рис. 3, *а*) формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 561 МПа от 40 (КТ15) до –521 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = = –76 МПа, s = 136 МПа и N = 3. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 401 МПа от 55 (КТ7) до –346 МПа (КТ19) при $\sigma_{ср}$ = = –79 МПа, s = 127 МПа и N = 4. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 511 МПа от 377 (КТ15) до –134 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = = 284 МПа, s = 129 МПа и N = 1. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 355 МПа от 299 (КТ1) до 654 МПа (КТ15) при $\sigma_{ср}$ = 553 МПа и s = 96 МПа.

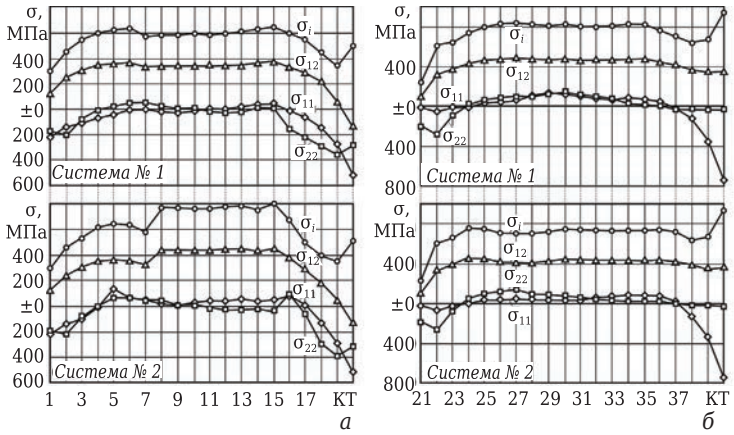

Рис. 3. Напряжения в ПСК (*а*) и ПСП (*б*) под действием распределенной силы

В ПСК системы № 2 (см. рис. 3, *а*) формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 650 МПа от 127 (КТ5) до –523 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = –41 МПа, s = 156 МПа и N = 2. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 476 МПа от 111 (КТ16) до –365 МПа (КТ19) при $\sigma_{ср}$ = –45 МПа, s = 139 МПа и N = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 592 МПа от 454 (КТ15) до –138 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = 319 МПа, s = 159 МПа и N = 1. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 490 МПа от 299 (КТ1) до 789 МПа (КТ15) при $\sigma_{ср}$ = 615 МПа и s = 158 МПа.

В ПСП системы № 1 (см. рис. 3, *б*) формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 868 МПа от 136 (КТ29) до –732 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = –16 МПа, s = 199 МПа и N = 2. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 423 МПа от 147 (КТ30) до –276 МПа (КТ22) при $\sigma_{ср}$ = 26 МПа, s = 110 МПа и N = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 385 МПа от 91 (КТ21) до 476 МПа (КТ27) при $\sigma_{ср}$ = 411 МПа, s = 90 МПа и N = 0. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 704 МПа от 242 (КТ21) до 946 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = 744 МПа и s = 143 МПа.

В ПСП системы № 2 (см. рис. 3, *б*) формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 824 МПа от 92 (КТ36) до –732 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = –25 МПа, s = 191 МПа и N = 2. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 403 МПа от 130 (КТ27) до –273 МПа (КТ22) при $\sigma_{ср}$ = 16 МПа, s = 99 МПа и N = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 347 МПа от 91 (КТ21) до 438 МПа (КТ24) при $\sigma_{ср}$ = 387 МПа, s = 77 МПа и N = 0. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 703 МПа от 241 (КТ21) до 944 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = 701 МПа и s = 126 МПа.

Обобщенные показатели неоднородности напряжений ПСК и ПСП, а также характеристики напряженного состояния границы между керамикой на основе нитрида кремния и покрытием из карбида титана (системы № 1 и 2) под действием распределенной силы $P = 4{,}0 \cdot 10^8$ Па приведены в табл. 2. Анализ этих данных показывает, что значения основных показателей неоднородности напряжений σ_{11} и интенсивности напряжений σ_i (кроме $\sigma_{ср}$ для σ_{11}) в ПСП выше по сравнению со значениями аналогичных показа-

Таблица 2

Показатели	σ_{11}		σ_{22}		σ_{12}		σ_i		Граница
	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	
Система № 1									
Σ	561	868	401	423	511	385	355	704	529,5
$\sigma_{макс}$	–521	–732	–346	–276	377	476	654	946	800,0
$\sigma_{мин}$	40	136	55	147	–134	91	299	242	270,5
$\sigma_{ср}$	–76	–16	–79	26	284	411	553	744	648,5
N	3	2	4	2	1	0	–	–	–
s	136	199	127	110	129	90	96	143	119,5
Система № 2									
Σ	650	824	476	403	592	347	490	703	596,5
$\sigma_{макс}$	–523	–732	–365	–273	454	438	789	944	866,5
$\sigma_{мин}$	127	92	111	130	–138	91	299	241	270,0
$\sigma_{ср}$	–41	–25	–45	16	319	387	615	701	658,0
N	2	2	2	2	1	0	–	–	–
s	156	191	139	99	159	77	158	126	142,0

телей в ПСК. Значения этих показателей для σ_{22} и σ_{12} (кроме $\sigma_{ср}$ для σ_{12}) в ПСП ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПСК. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2.

Установлено, что значения $\sigma^{гр}_{макс}$, $\sigma^{гр}_{ср}$, $\Sigma^{гр}$ и $s^{гр}$, характеризующие напряженное состояние границы керамика – покрытие в системе № 2, превосходят аналогичные характеристики системы № 1 на 8, 2, 13 и 19 % соответственно при практически одинаковых значениях $\sigma^{гр}_{мин}$. Это свидетельствует (как и в случае действия сосредоточенной силы) о меньшей вероятности появления дефектов под действием распределенной силы на участках контакта зерен Si_3N_4 с покрытием TiC по сравнению с вероятностью зарождения дефектов на границе зерна TiC с покрытием TiC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием расчетной методики исследования напряженного состояния границы между керамикой и покрытием выявлены основные закономерности формирования напряжений в приграничных слоях нитридной керамики и покрытия из TiC под действием сосредоточенной и распределенной сил. Установлено, что под действием сосредоточенной силы в системе с зерном Si_3N_4 характеристики, определяющие напряженное состояние границы «керамика – покрытие», меньше по сравнению с аналогичными показателями системы с зерном TiC на 5, 3 и 6 % соответственно при практически равных значениях $\sigma^{гр}_{мин}$ и $s^{гр}$. Под действием распределенной силы в системе с зерном Si_3N_4 значения характеристик, определяющих напряженное состояние границы, меньше аналогичных характеристик системы с зерном TiC на 8, 2, 13 и 19 % соответственно при практически одинаковых значениях $\sigma^{гр}_{мин}$. Это свидетельствует о более благоприятном напряженном состоянии границы «керамика – покрытие» в системе с зерном Si_3N_4 и, соответственно, меньшей вероятности появления дефектов под действием силовой нагрузки на участках контакта зерен Si_3N_4 с покрытием TiC, чем на участках контакта зерен TiC с покрытием идентичного состава. Анализ полученных результатов свидетельствует о необходимости учета напряженного состояния границы «керамика – покрытие» при анализе износа и разрушения керамических деталей и инструментов на этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации.

* * *

Настоящая работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание 9.1372.2017/4.6).

Библиографический список

1. ***Кузин, В. В.*** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 39–43.

Kuzin, V. V. Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / *V. V. Kuzin* // Russ. Eng. Res. — 2004. — Vol. 24, No. 5. — P. 21–27.

2. ***Dobrzanski, L. A.*** Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics / *L. A. Dobrzanski, D. Pakuła, A. Kriz* [et al.] // J. Mater. Process. Technol. — 2006. — Vol. 175. — P. 179–185.

3. ***Kim, D. W.*** TiC and TiN coatings formed on Si_3N_4–TiC composite ceramics by chemical vapour deposition / *D. W. Kim, Y. J. Park, J. G. Lee* [et al.] // Thin Solid Films. — 1988. — Vol. 165, № 1. — P. 149–161.

4. ***Xiangming, Li.*** Comparison in microstructure and mechanical properties of porous Si_3N_4 ceramics with SiC and Si_3N_4 coatings / *Li Xiangming, Yin Xiaowei, Zhang Litong* [et al.] // Mater. Sci. Eng., A. — 2009. — Vol. 527, № 1/2. — P. 103–109.

5. ***Zhou, Fei.*** Friction and wear property of *a*-CN_x coatings sliding against Si_3N_4 balls in water / *Fei Zhou, Xiaolei Wang, Koji Kato* [et al.] // Wear. — 2007. — Vol. 263, № 7–12. — P. 1253–1258.

6. ***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.

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. — Т. 34, №. 3. — С. 199–203.

7. ***Qin, Jie.*** Continuous and varied depth-of-cut turning of gray cast iron by using uncoated and TiN/Al_2O_3 coated silicon nitride-based ceramic tools / *Jie Qin, Ying Long, Junjie Zeng* [et al.] // Ceram. Int. — 2014. — Vol. 40, № 8. — Part A. — P. 12245–12251.

8. ***Кузин, В. В.*** Разработка и исследование режущих инструментов из нитридной керамики с покрытием / *В. В. Кузин* // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2006. — № 9. — С. 48–52.

9. ***Кузин, В. В.*** Микроструктурное моделирование деформационных процессов в волоке из спеченных структурно-неоднородных материалов / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Вестник машиностроения. — 2014. — № 3. — С. 42–46.

10. ***Григорьев, С. Н.*** Напряженно-деформированное состояние инструментов из нитридной керамики с покрытием / *С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. А. Волосова* // Вестник машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 64–69.

Grigor'ev, S. N. Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / *S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova* // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.

11. ***Волосова, М. А.*** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 2. Действует сосредоточенная сила / *М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 77–82.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coatings on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 2. Concentrated force action / *M. A. Volosova, S. N.*

Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 487–491.

12. ***Волосова, М. А.*** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 3. Действует распределенная силовая нагрузка / *М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 12. — С. 35–40.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 3. Action of distributed force load / *M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin* // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 565–569.

13. ***Волосова, М. А.*** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 4. Действует тепловой поток / *М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 47–52.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 4. Action of heat flow / *M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin* // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

14. ***Волосова, М. А.*** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 5. Действует комбинированная нагрузка / *М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 4. — С. 49–53.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 5. A combined load operates / *M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin* // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 197–200.

15. ***Кузин, В. В.*** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — сосредоточенная силовая нагрузка / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 8. — С. 59–65.

Kuzin, V. V. Transformation of the stressed state of a surface layer of nitride ceramic with a change in TiC-coating thickness. Loading version — concentrated force load / *V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 427–433.

16. ***Кузин, В. В.*** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — распределенная силовая нагрузка / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 58–63.

Kuzin, V. V. Nitride ceramic surface layer stressed state transformation with a change in TiC-coating thickness. Stress — distributed force load version / *V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov, M. A. Volosova* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. —P. 551–556.

17. ***Кузин, В. В.*** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — тепловой поток / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 2. — С. 54–60.

Kuzin V. V. Nitride ceramic surface layer stressed state transformation with a change in TiC-coating thickness. Stress version — heat flow / *V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov, M. A. Volosova* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 82–88.

18. ***Кузин, В. В.*** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — комбинированная нагрузка / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 4. — С. 53–59.

Kuzin, V. V. Transformation of the stressed state of a surface layer of nitride ceramic with a change in TiC-coating thickness. Loading version — combined loading / *V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov, M. A. Volosova* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 2. — P. 220–226.

19. ***Кузин, В. В.*** Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием силовой нагрузки / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, П. Дашич* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 6. — С. 60–65.

20. ***Кузин, В. В.*** Математическое моделирование термомеханических процессов на границе слоев TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, П. Дашич* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 8. — С. 64–69.

21. ***Кузин, В. В.*** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием силовых нагрузок / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 38–44.

Kuzin, V. V. The stressed state of the boundary between ceramic and a coating under the effect of power loads / *V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 192–198.

22. ***Кузин, В. В.*** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием комбинированной нагрузки / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 43–48.

Kuzin, V. V. Stressed state of a boundary between ceramic and coating under action of a combined load / *V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 308–312.

23. ***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.

24. ***Григорьев, С. Н.*** Автоматизированная система термопрочностных расчетов керамических режущих пластин / *С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.

Grigor'ev, S. N. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / *S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

25. ***Кузин, В. В.*** Математическая модель напряженно-деформированного состояния керамической режущей пластины / *В. В. Кузин, В. И. Мяченков* // Вестник машиностроения. — 2011. — № 10. — С. 75–80.

Kuzin, V. V. Stress-strain state of ceramic cutting plate / *V. V. Kuzin, V. I. Myachenkov* // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 10. — P. 994–1000. ■

Получено 29.08.17
© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова, 2017 г.