

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ КЕРАМИКОЙ И ПОКРЫТИЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛОВЫХ НАГРУЗОК

Разработана методика исследования напряженного состояния границы между керамикой и покрытием, с использованием которой выявлены основные закономерности формирования напряжений в приграничных слоях нитридной керамики и покрытия из нитрида титана под действием сосредоточенной и распределенной сил. Отмечена необходимость учета напряженного состояния границы керамика – покрытие при анализе износа и разрушения керамических деталей при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Ключевые слова: керамика, покрытие, граница, приграничный слой, напряженное состояние, структурная неоднородность напряжений, сосредоточенная сила, распределенная сила.

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс во многих областях техники связан с разработкой керамических материалов со специальными поверхностными свойствами, которые обеспечиваются разными технологическими методами, в том числе нанесением функциональных покрытий [1, 2]. Высокая эффективность керамики с твердыми и тонкими покрытиями доказана ее многочисленными применениями в качестве конструкционного и инструментального материалов [3–6]. Использование резцов и фрез, оснащенных керамическими режущими пластинами с разными по составу и структуре покрытиями, повышает надежность процесса резания и частично выполняет жесткие требования современной механической обработки [7, 8]. Этот эффект достигается за счет «залечивания» поверхностных дефектов технологического происхождения на керамике и уменьшения напряжений, формирующихся в ее поверхностном слое под действием эксплуатационных нагрузок [9–11].

Однако наряду с позитивным влиянием покрытий при их применении имеется негативный эффект, заключающийся в появлении под действием эксплуатационных нагрузок разных структурных дефектов и трещин на границе между керамикой и покрытием [9]. Часто их образование приводит к преждевременному выходу керамических деталей и инструментов из работоспособного состояния. Традиционное объяснение этого эффекта, основанное на факте

образования высоких напряжений на границе между керамикой и покрытием, весьма поверхностно и имеет крайне узкую научную ценность и практическую значимость. Более того, ограниченность результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов не позволяет связать напряжения, образующиеся на границе керамика – покрытие под действием внешних нагрузок, с износом и разрушением керамических деталей и инструментов. Эта неопределенность затрудняет решение многих конструкторских, технологических и эксплуатационных задач, обеспечивающих эффективное использование керамических материалов.

В работе поставлена цель — разработать методику исследования напряженного состояния границы между керамикой и покрытием, а также апробировать ее при изучении системы нитридная керамика — покрытие из нитрида титана, находящейся под действием силовых нагрузок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При разработке методики исследования напряженного состояния границы керамика – покрытие использовали следующие исходные положения. Контакт керамики и однослойного покрытия, имеющих разные структуру, физико-механические и теплофизические свойства, происходит по границе, которая является бесконечно узкой областью (возможное присутствие переходных слоев не учитывается). На этой границе, являющейся линией при решении двухмерной задачи [12], происходит только скачкообразный переход от свойств одной среды к свойствам другой. Поэтому понятие «напряженное состояние границы» между керамикой и покрытием в настоящей работе трактуется более широко.



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

Ключевым положением разработанной методики является то, что термином «граница» между керамикой и покрытием определена совокупность приграничного слоя керамики (ПСК) и приграничного слоя покрытия (ПСП), толщина которых сопоставима с размером элементов структуры керамики. В элементарных объемах приграничных слоев под действием внешних нагрузок формируются микронапряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} , с использованием которых определяется интенсивность напряжений σ_i ($\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 4\sigma_{12}^2}$). Анализ структурной неоднородности напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , и σ_i в ПСК и ПСП позволяет определить интегральные показатели характеристики напряженного состояния границы между этими слоями. При этом случайное распределение зерен нитрида кремния (основная фаза) и карбида титана (упрочняющая фаза) на поверхности керамики учитывается комбинацией систем, сформированных на основе микроструктурной модели поверхностного слоя нитридной керамики.

С использованием этих исходных положений разработана методика исследования напряженного состояния границы между керамикой и покрытием под действием внешних нагрузок. Методика основана на построении микроструктурной и математической моделей, численном моделировании напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородной среды с использованием метода контрольных точек [13–16]. Применение такого подхода к решению задач микромеханики керамики с покрытием подтвердило его высокую эффективность [17–20]. Структурную неоднородность напряжений в ПСК и ПСП характеризовали следующими статистическими показателями: σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i ; наибольшим σ_{\max} , наименьшим σ_{\min} и средним $\sigma_{\text{ср}}$ значениями, диапазоном изменения Σ , стандартным отклонением s и числом N изменения

знака. Напряженное состояние границы керамика – покрытие оценивали характеристиками, рассчитанными как среднее арифметическое σ_{\max} , σ_{\min} , $\sigma_{\text{ср}}$, Σ и s значений интенсивности напряжений σ_i в ПСК и ПСП.

Разработанная методика апробирована при исследовании системы на основе нитрида кремния Si_3N_4 (плотность $\rho = 3,2 \text{ г/см}^3$, модуль упругости $E = 300 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) с упрочняющей фазой из карбида титана TiC ($\rho = 4,9 \text{ г/см}^3$, $E = 484 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,22$, $\alpha = 7,95 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и межзеренной фазой из оксида иттрия Y_2O_3 ($\rho = 4,9 \text{ г/см}^3$, $E = 250 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,22$, $\alpha = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), на поверхности которой имеется слой из нитрида титана TiN ($\rho = 5,44 \text{ г/см}^3$, $E = 440 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,25$, $\alpha = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), контактирующий со слоем чугуна СЧ32 ($\rho = 5,68 \text{ г/см}^3$, $E = 180 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,2$; $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$). Теплопроводность λ этих материалов задана следующими формулами: $\lambda = 23,2 e^{0,0002T}$, $\lambda = 686,05 T^{0,82}$, $\lambda = 1001,7 T^{0,63}$, $\lambda = 36,6 e^{0,00045T}$ и $\lambda = 44,028 e^{-0,0005T}$ для TiC , Y_2O_3 , Si_3N_4 , TiN и СЧ32 . Перечень справочников, из которых позаимствованы значения этих свойств, приведен в публикации [21].

Расчетная схема (рис. 1) представлена конструкцией, в которой зерно эллипсной формы и размерами $a = 3 \text{ мкм}$ и $b = 2 \text{ мкм}$ заделано в матрицу через межзеренную фазу толщиной $\delta_f = 0,2 \text{ мкм}$. На поверхности керамики последовательно расположены слои покрытия толщиной 5 мкм и слой металла толщиной 1 мкм . На этой схеме выделены граница керамика – покрытие, ПСК и ПСП. Использовали две системы, различающиеся материалом зерна: № 1 — зерно и матрица из Si_3N_4 , межзеренная фаза из Y_2O_3 ; № 2 — зерно из TiC , межзеренная фаза из Y_2O_3 , матрица из Si_3N_4 . К свободной поверхности конструкции в расчетной схеме прикладывали сосредоточенную силу $F = 0,1 \text{ Н}$, действующую под углом 45° , и распределенную силу $P = 4,0 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

Численные эксперименты выполняли в автоматизированной системе термомеханических расчетов RKS-ST v.1.0 [21]. Выбранные контрольные точки (КТ) симметрично расположены в ПСК (КТ1–КТ20) и ПСП (КТ21–КТ40).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием сосредоточенной силы представлены на рис. 2. Видно, что кривые, характеризующие изменение напряжений в ПСК и ПСП, имеют достаточно сложный вид, что свидетельствует

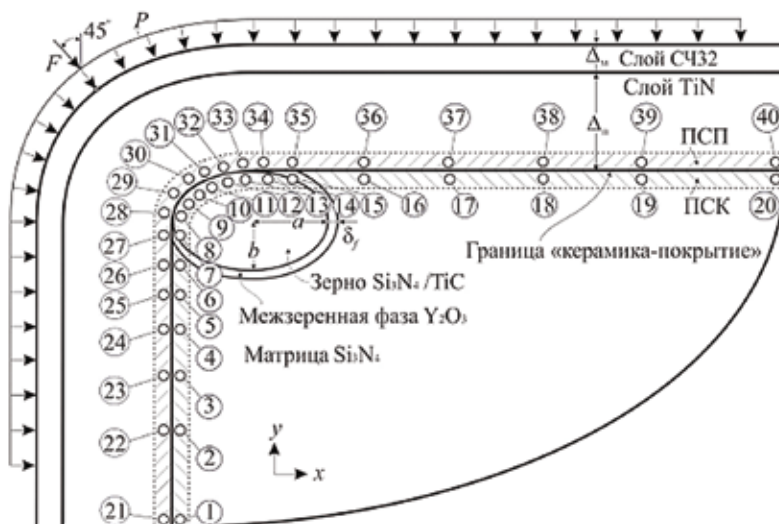


Рис. 1. Расчетная схема и расположение КТ

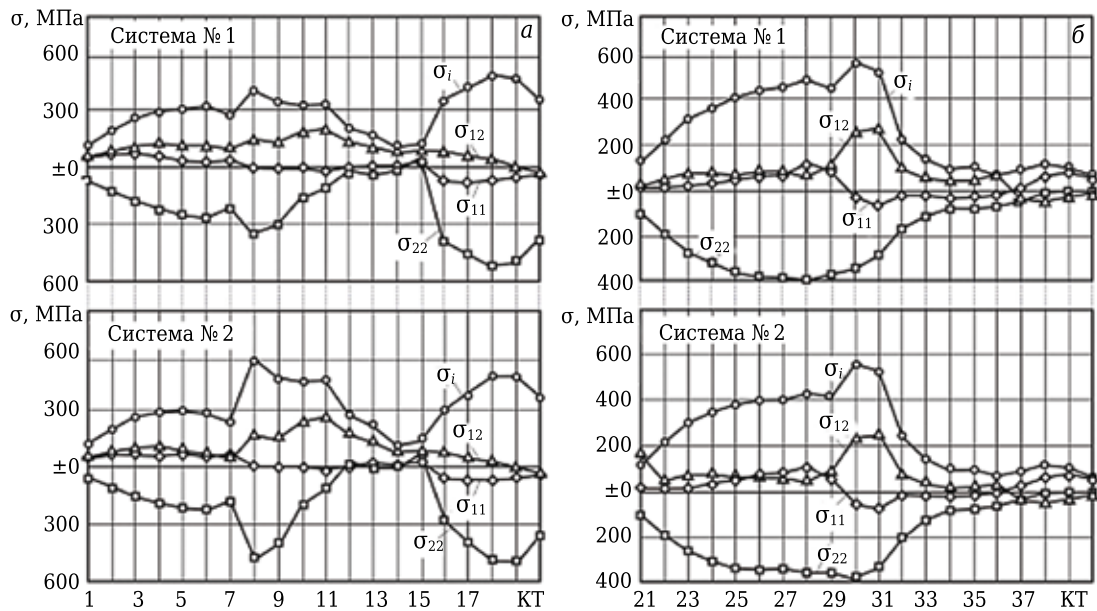


Рис. 2. Напряжения в ПСК (а) и ПСП (б) под действием сосредоточенной силы

ет о высокой структурной неоднородности напряжений в приграничных слоях. Формы кривых для ПСК и ПСП одной системы существенно различаются. Сравнение формы кривых σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i для аналогичных приграничных слоев разных систем показывает их практически идентичный вид. Например, 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} , имеющие сглаженный вид; напряженное состояние ПСП (КТ21–КТ40) — кривые, имеющие по одному максимуму в КТ31 (σ_{11} и σ_{12}), КТ28 (σ_{22} для системы № 1), КТ30 (σ_{22} для системы № 2) и КТ30 (σ_i).

Другая важная особенность напряжений, сформировавшихся под действием сосредоточенной силы, — 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 проанализируем 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 $\Sigma = 150$ МПа — от 53 (КТ2) до -97 МПа (КТ16) при $\sigma_{cp} = -17$ МПа, стандартном отклонении $s = 47$ МПа и числе изменений знака $N = 3$ (см. рис. 2, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 559$ МПа — от 43 (КТ15) до -516 МПа (КТ18) при $\sigma_{cp} = -226$ МПа,

$s = 167$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 224$ МПа — от 180 (КТ11) до -44 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 79$ МПа, $s = 54$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 373$ МПа — от 107 (КТ14) до 480 МПа (КТ18) при $\sigma_{cp} = 294$ МПа и $s = 112$ МПа.

В ПСК системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне $\Sigma = 137$ МПа — от 55 (КТ5) до -82 МПа (КТ18) при $\sigma_{cp} = -5$ МПа, $s = 47$ МПа и $N = 3$ (см. рис. 2, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 552$ МПа — от 46 (КТ15) до -506 МПа (КТ18) при $\sigma_{cp} = -227$ МПа, $s = 176$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 293$ МПа — от 248 (КТ11) до -45 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 83$ МПа, $s = 73$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 445$ МПа — от 111 (КТ14) до 556 МПа (КТ8) при $\sigma_{cp} = 311$ МПа и $s = 132$ МПа.

В ПСП системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне $\Sigma = 180$ МПа — от 115 (КТ28) до -65 МПа (КТ31) при $\sigma_{cp} = 19$ МПа, $s = 48$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 2, б). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 391$ МПа — от -7 (КТ40) до -398 МПа (КТ28) при $\sigma_{cp} = -203$ МПа, $s = 145$ МПа и $N = 0$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 308$ МПа — от 255 (КТ31) до -53 МПа (КТ38) при $\sigma_{cp} = 60$ МПа, $s = 70$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 483$ МПа — от 63 (КТ40) до 546 МПа (КТ30) при $\sigma_{cp} = 262$ МПа и $s = 174$ МПа.

В ПСП системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне $\Sigma = 174$ МПа — от 98 (КТ28) до -76 МПа (КТ31) при $\sigma_{cp} = 19$ МПа, $s = 46$ МПа и $N = 2$. Диапазон изменения

напряжений σ_{22} составляет 377 МПа — от -7 (КТ40) до -384 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = -200$ МПа, $s = 139$ МПа и $N = 0$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 306$ МПа — от 245 (КТ31) до -51 МПа (КТ38) при $\sigma_{ср} = 58$ МПа, $s = 79$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 482$ МПа — от 63 (КТ40) до 545 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = 252$ МПа и $s = 165$ 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 нитрида 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 в ПСП выше, а напряжений σ_{22} ниже по сравнению со зна-

чениями аналогичных показателей в ПСК. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2. Отмечено, что в ПСП системы № 1 значение s для σ_i в 1,6 раза больше, чем в ПСК, для системы № 2 эта разница составляет 1,3 раза.

Установлено, что значения $\sigma_{макс}$, $\sigma_{мин}$, $\sigma_{ср}$, Σ и s для σ_i , характеризующие напряженное состояние границы керамика – покрытие в системе № 2, превосходят аналогичные характеристики системы № 1 на 8, 7, 2, 1 и 4 % соответственно. Этот факт позволяет предположить, что вероятность появления дефектов под действием сосредоточенной силы на участках контакта зерен из Si_3N_4 с покрытием TiN меньше по сравнению с вероятностью зарождения дефектов на границе зерно из TiC – покрытие из TiN.

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па показаны на рис. 3. Видно, что кри-

Таблица 1. Показатели неоднородности напряжений в ПСК и ПСП и характеристики напряженного состояния границы между керамикой и покрытием, МПа, под действием силы F

Показатели	σ_{11}		σ_{22}		σ_{12}		σ_i		Граница
	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	
<i>Система № 1</i>									
Σ	150	180	559	391	224	308	373	483	428
$\sigma_{макс}$	-97	115	-516	-398	180	255	480	546	513
$\sigma_{мин}$	53	-65	43	-7	-44	-53	107	63	85
$\sigma_{ср}$	-17	19	-226	-203	79	60	294	262	278
N	3	2	2	0	1	1	-	-	-
s	47	48	167	145	54	79	112	174	143
<i>Система № 2</i>									
Σ	137	174	552	377	293	306	445	482	463,5
$\sigma_{макс}$	-82	98	-506	-384	248	245	556	545	550,5
$\sigma_{мин}$	55	-76	46	-7	-45	-51	111	63	87
$\sigma_{ср}$	-5	19	-227	-200	83	58	311	252	281,5
N	4	2	4	0	1	0	-	-	-
s	47	46	176	139	73	79	132	165	148,5

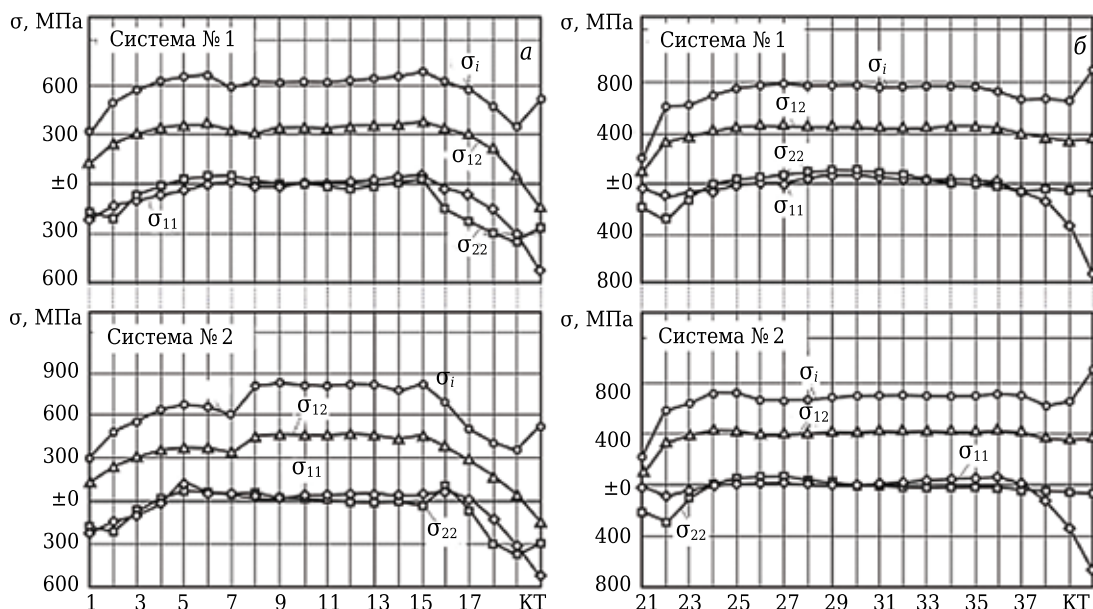


Рис. 3. Напряжения в ПСК (а) и ПСП (б) под действием распределенной силы

вые на всех графиках имеют одноподобный вид и их основное различие заключается в неодинаковых значениях σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i . Выявлено, что в ПСК системы № 1 на участке КТ5–КТ10 напряжения σ_{11} являются сжимающими, а в ПСП на участке КТ25–КТ30 эти напряжения растягивающие; напряжения σ_{22} в ПСК системы № 1 на участке КТ11–КТ13 сжимающие, в ПСП на участке КТ31–КТ33 растягивающие. В ПСК системы № 2 аналогичные «неблагоприятные» участки не выявлены.

Установлено влияние материала 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 $\Sigma = 562$ МПа — от 36 (КТ15) до -526 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср} = -76$ МПа, $s = 138$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 388$ МПа — от 48 (КТ7) до -340 МПа (КТ19) при $\sigma_{ср} = -78$ МПа, $s = 126$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 517$ МПа — от 384 (КТ15) до -133 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср} = 290$ МПа, $s = 131$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 365$ МПа — от 302 (КТ1) до 667 МПа (КТ15) при $\sigma_{ср} = 566$ МПа и $s = 101$ МПа.

В ПСК системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне $\Sigma = 660$ МПа — от 132 (КТ5) до -528 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср} = -41$ МПа, $s = 158$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 477$ МПа — от 116 (КТ16) до -361 МПа (КТ19) при $\sigma_{ср} = -43$ МПа, $s = 138$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 599$ МПа — от 462 (КТ9) до -137 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср} = 326$ МПа, $s = 163$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 501$ МПа — от 301 (КТ1) до 802 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = 628$ МПа и $s = 166$ МПа.

В ПСП системы № 1 (см. рис. 3, б) формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазо-

не $\Sigma = 786$ МПа — от 109 (КТ29) до -677 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср} = -22$ МПа, $s = 181$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 370$ МПа — от 114 (КТ30) до -256 МПа (КТ22) при $\sigma_{ср} = 16$ МПа, $s = 95$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 366$ МПа — от 95 (КТ21) до 461 МПа (КТ27) при $\sigma_{ср} = 404$ МПа, $s = 85$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 675$ МПа — от 233 (КТ21) до 908 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср} = 728$ МПа и $s = 134$ МПа.

В ПСП системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне $\Sigma = 760$ МПа — от 83 (КТ36) до -677 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср} = -29$ МПа, $s = 175$ МПа и $N = 3$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне $\Sigma = 360$ МПа — от 108 (КТ27) до -252 МПа (КТ22) при $\sigma_{ср} = 7$ МПа, $s = 86$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне $\Sigma = 337$ МПа — от 94 (КТ21) до 431 МПа (КТ27) при $\sigma_{ср} = 381$ МПа, $s = 73$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне $\Sigma = 675$ МПа — от 232 (КТ21) до 907 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср} = 685$ МПа и $s = 121$ МПа.

Обобщенные показатели неоднородности напряжений ПСК и ПСП, а также характеристики напряженного состояния границы между керамикой на основе нитрида кремния и покрытием из нитрида 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 в ПСП выше, а σ_{22} и σ_{12} ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПСК. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2.

Установлено, что показатели, характеризующие напряженное состояние границы керамика – покрытие в системе № 2, кроме $\sigma_{ср}$, превосходят аналогичные характеристики системы № 1 на

Таблица 2. Показатели неоднородности напряжений в ПСК и ПСП и характеристики напряженного состояния границы между керамикой и покрытием, МПа, под действием силы P

Показатели	σ_{11}		σ_{22}		σ_{12}		σ_i		Граница
	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	
<i>Система № 1</i>									
Σ	562	786	388	370	517	366	365	675	520
$\sigma_{\text{макс}}$	-526	-677	-340	-256	384	461	667	908	787,5
$\sigma_{\text{мин}}$	36	109	48	114	-133	95	302	233	267,5
$\sigma_{\text{ср}}$	-76	-22	-78	16	290	404	566	728	647
N	4	2	4	2	1	0	–	–	–
s	138	181	126	95	131	85	101	134	117,5
<i>Система № 2</i>									
Σ	660	760	477	360	599	337	501	675	588
$\sigma_{\text{макс}}$	-528	-677	-361	-252	462	431	802	907	854,5
$\sigma_{\text{мин}}$	132	83	116	108	-137	94	301	232	266,5
$\sigma_{\text{ср}}$	-41	-29	-43	7	326	381	628	685	656,5
N	2	3	2	2	1	0	–	–	–
s	158	175	138	86	163	73	166	121	143,5

13, 9, 1 и 22 % соответственно при практически одинаковых значениях $\sigma_{\text{ср}}$. Этот факт позволяет так же, как и в случае действия сосредоточенной силы, говорить о меньшей вероятности появления дефектов под действием распределенной силы на участках контакта зерен из Si_3N_4 с покрытием TiN по сравнению с вероятностью зарождения дефектов на границе зерна из TiC с покрытием из TiN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанной методики исследования напряженного состояния границы между керамикой и покрытием выявлены основные закономерности формирования напряжений в приграничных слоях нитридной керамики и покрытия из нитрида титана под действием сосредоточенной и распределенной сил. Установлено, что под действием сосредоточенной силы в системе с зерном из нитрида кремния характеристики Σ , $\sigma_{\text{макс}}$, $\sigma_{\text{мин}}$, $\sigma_{\text{ср}}$, s , определяющие напряженное состояние границы керамика – покрытие, меньше по сравнению с аналогичными показателями системы с зерном из карбида титана на 8, 7, 2, 1 и 4 % соответственно.

Библиографический список

1. **Верещака, А. С.** Методология и примеры проектирования эффективного технологического процесса изготовления инструментального материала / А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, В. А. Ким [и др.] // СТИН. — 2014. — № 1. — С. 5–12.
Vereshchaka, A. S. Design of an effective manufacturing process for tool materials / A. S. Vereshchaka, S. N. Grigoriev, V. A. Kim [et al.] // Russian Engineering Research. — 2014. — Vol. 34. — С. 516–521.
2. **Miao, H. Z.** Investigation on the modification methods to ceramic cutting tools / H. Z. Miao, Z. J. Peng, W. J. Si [et al.] // Key Engineering Materials. — 2005 — Vols. 280–283. — P. 1197–1202.
3. **Pakuła, D.** Structure and properties of the Si_3N_4 nitride ceramics with hard wear resistant coatings / D. Pakuła, L. A. Dobrzański, K. Gołombek [et al.] // J. Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 157/158. — P. 388–393.
4. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
Kuzin, V. V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
5. **Zhijian, P.** Hard and wear-resistant titanium nitride films for ceramic cutting tools by pulsed high energy density plasma / P. Zhijian, M. Hezhuo, W. Wei [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2003 — Vol. 166, № 2. — P. 183–188.
6. **Long, Y.** Cutting performance and wear mechanism of Ti–Al–N/Al–Cr–O coated silicon nitride ceramic cutting inserts / Y. Long, J. Zeng, W. Shanghua // Ceramics International. — 2014. — Vol. 40, № 7. Part A. — P. 9615–9620.

Под действием распределенной силы в системе с зерном из нитрида кремния значения характеристик $\sigma_{\text{макс}}$, $\sigma_{\text{мин}}$, s , определяющих напряженное состояние границы, меньше аналогичных характеристик системы с зерном из карбида титана на 13, 9, 1 и 22 % соответственно при одинаковых значениях $\sigma_{\text{ср}}$. Это свидетельствует о более благоприятном напряженном состоянии границы керамика – покрытие в системе с зерном из нитрида кремния и, соответственно, меньшей вероятности появления дефектов под действием силовой нагрузки на участках контакта зерен Si_3N_4 с покрытием TiN, чем на участках контакта зерен TiC с таким же покрытием. Анализ этих 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

7. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
Kuzin, V. V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
8. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В. В. Кузин, С. И. Досько, В. Ф. Попов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 46–50.
Kuzin, V. V. Tooling for high-speed cutting / V. V. Kuzin, S. I. Dos'ko, V. F. Popov [et al.] // Russian Engineering Research. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.
9. **Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated Si_3N_4 ceramic tools in turning grey cast iron / V. Kuzin, S. Grigoriev // Key Engineering Materials. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.
10. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton, D. Batako // Proceedings of the 37th International Conference MATADOR. — 2012–2013. — P. 181–184.
11. **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.
12. **Фиников, С. П.** Теория поверхностей : изд. 4, перераб., испр. / С. П. Фиников. — М. : Изд. группа URSS, Ленанд, 2016. — 304 с.

13. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

Kuzin, V. V. Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

14. **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.

15. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 1. Методика исследования / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 8. — С. 28–31.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coatings on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 1. Research procedure / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 338–340.

16. **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.

17. **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 // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 487–491.

18. **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 // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 565–569.

19. **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 // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

20. **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 // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 197–200.

21. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термостойких 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. ■

Получено 23.03.16

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

TECNARGILLA 2016
 25° Salone internazionale delle tecnologie e delle forniture per l'industria ceramica e del laterizio
 Il futuro della ceramica
 26-30 сентября 2016 г.
 г. Римини, Италия
 tecnargilla.it