

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

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ КЕРАМИКОЙ И ПОКРЫТИЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ НАГРУЗКИ

Выявлены основные закономерности напряженного состояния границы между керамикой и покрытием при одновременном действии теплового потока, сосредоточенных и распределенных сил. Определено влияние материала зерна керамики на напряженное состояние границы керамика – покрытие.

**Ключевые слова:** керамика, покрытие, граница, приграничный слой, напряженное состояние, структурная неоднородность напряжений, тепловой поток, комбинированная нагрузка.

### ВВЕДЕНИЕ

Новейшие исследования и технологические достижения убедительно доказывают перспективность использования покрытий для конструкционных и инструментальных материалов, в том числе керамических [1, 2]. Керамика с покрытием, имеющая повышенные значения тепло-, термо-, трещино- и износостойкости поверхностного слоя, находит применение в энергетике, машиностроении, двигателестроении, нефте- и газодобыче [3–5]. Наибольшая эффективность этого композиционного материала достигается при изготовлении металлорежущих инструментов [6–8]. Уменьшение коэффициента трения с обрабатываемым материалом и теплового потока во внутренние объемы инструмента позволяет использовать инструменты при высокоскоростной обработке, когда действуют экстремально высокие эксплуатационные нагрузки [9–11]. Другой позитивный эффект покрытия — уменьшение напряжений и их структурной неоднородности в инструментальной керамике под действием внешних нагрузок [12–15].

Однако проблемным вопросом этого композиционного материала является резкое изменение физико-механических и теплофизических свойств на границе керамика – покрытие [16, 17]. Вследствие этого явления возникают многие нежелательные процессы, протекающие на этой границе и отрицательно влияющие на эксплуатационные характеристики керамических деталей и инструментов [18]. В работе [19] с использованием оригинальной методики предпринята попытка понять природу этих процессов. Исследовано напряженное состояние границы

между нитридной керамикой и покрытием из нитрида титана под действием силовой нагрузки. Наибольший интерес представляет анализ напряженного состояния этой границы при высоких температурах. В настоящей работе поставлена цель — исследовать напряженное состояние границы нитридная керамика – покрытие из нитрида титана при совместном действии сил и теплового потока (при комбинированной нагрузке).

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования напряженного состояния границы керамика – покрытие, с использованием которой выполнены настоящие численные эксперименты, подробно описана в работе [18]. Расчетная схема (рис. 1) разработана с использованием построенной микроструктурной модели [19]. Конструкция состоит из зерна эллипсной формы размерами  $a = 3$  мкм и  $b = 2$  мкм, заделанного в матрицу через межзеренную фазу толщиной  $\delta_f = 0,2$  мкм, на его свободных поверхностях последовательно расположены слои покрытия из TiN толщиной 5 мкм и чугуна СЧ32 толщиной 1 мкм. На схеме выделена граница керамика – покрытие, которую создают приграничный слой керамики (ПСК) и приграничный слой покрытия (ПСП). Были исследованы две системы на основе нитрида кремния: в системе № 1 зерно и матрица выполнены из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , межзеренная фаза — из  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; в системе № 2 зерно выполнено из TiC, межзеренная фаза — из  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , матрица — из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Исследования напряженного состояния границы между керамикой и покрытием выполняли с использованием автоматизированной системы термпрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [21] в два этапа. На первом этапе к свободной поверхности конструкции прикладывали тепловой поток  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (теплоотвод с поверхностей, свобод-



В. В. Кузин  
E-mail: kuzena@post.ru

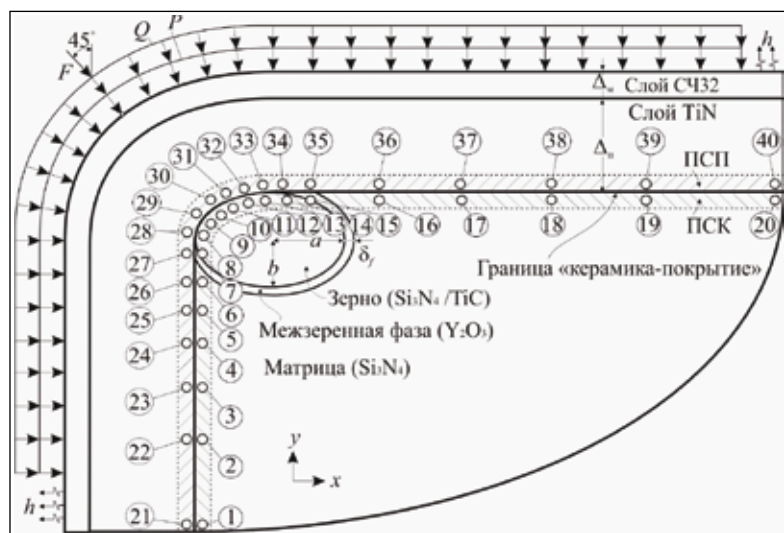


Рис 1. Расчетная схема

ных от теплового потока, в окружающую среду осуществляли с коэффициентом  $h = 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·град)). На втором этапе конструкцию нагружали тепловым потоком  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> ( $h = 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·град)), сосредоточенной  $F = 0,1$  Н и распределенной  $P = 4,0 \cdot 10^8$  силами. Структурную неоднородность напряжений в ПСК и ПСП характеризовали следующими статистическими характеристиками  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$ : наибольшим  $\sigma_{\max}$ , наименьшим  $\sigma_{\min}$  и средним  $\sigma_{\text{ср}}$  значениями, диапазоном изменения  $\Sigma$ , стандартным отклонением  $s$  и числом изменения знака  $N$ . Для этого использовали метод контрольных точек (КТ) [22], причем выбранные КТ были симметрично расположены в ПСК (КТ1–КТ20) и ПСП (КТ21–КТ40). Напряженное состояние границы керамика – покрытие оценивали теми же характеристиками, рассчитанными как среднее арифметическое  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$ ,  $\Sigma$  и  $s$  значений интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в ПСК и ПСП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов температур и напряжений в ПСК и ПСП двух систем под действием теплового потока представлены на рис. 2 и 3. Видно, что кривые изменения температур в ПСК и ПСП имеют одинаковый вид и характеризуются тремя участками. На первом участке (КТ1–КТ8 ПСК и КТ21–КТ28 ПСП) температура резко повышается, во втором (КТ8–КТ15 ПСК и КТ28–КТ35 ПСП) температура практически не изменяется, на третьем участке (КТ15–КТ20 ПСК и КТ35–КТ40 ПСП) температура резко понижается. Этот вид кривых связан с условиями теплоотвода: КТ1/КТ20 в ПСП и КТ21/КТ40 в ПСК примыкают к участкам, с которых отводится тепло. Наивысшие температуры зафиксированы на отрезках КТ8–КТ15 ПСК и КТ28–

КТ35 ПСП, формирующих участок контакта зерна и межзеренной фазы керамики с покрытием.

Установлено, что температура в ПСК системы № 1 на участке КТ1–КТ8 повышается с 248 до 902 °С, а на участке КТ15–КТ20 понижается до 416 °С (см. рис. 2, а). Температура в ПСП на участке КТ21–КТ28 повышается с 250 до 909 °С, а на участке КТ35–КТ40 понижается до 428 °С (см. рис. 2, б). Несмотря на незначительную разницу в тепловом состоянии ПСК и ПСП выявлено существенное различие в значениях напряжений и характере их изменения в поверхностных слоях керамики системы № 1. Происходит пиковое изменение значений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  в КТ7 и КТ14 ПСК этой системы, в которых межзеренная фаза контактирует с покрытием.

В ПСК керамики системы № 1 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 575 МПа — от 321 (КТ9) до -254 МПа (КТ14) при среднем значении  $\sigma_{\text{ср}} = 156$  МПа, стандартном отклонении  $s = 169$  МПа и числе изменений знака  $N = 5$  (см. рис. 2, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 715 МПа — от 456 (КТ20) до -259 МПа (КТ7) при  $\sigma_{\text{ср}} = 172$  МПа,  $s = 177$  МПа и  $N = 5$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 560 МПа — от -117 (КТ11) до -677 МПа (КТ20) при  $\sigma_{\text{ср}} = -203$  МПа,  $s = 129$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 980 МПа — от 292 (КТ2) до 1272 МПа (КТ20) при  $\sigma_{\text{ср}} = 445$  МПа и  $s = 213$  МПа.

В ПСП формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 1264 МПа — от 237 (КТ21) до -1027 МПа (КТ40) при  $\sigma_{\text{ср}} = -394$  МПа,  $s = 350$  МПа и  $N = 1$  (см. рис. 2, б). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 1063 МПа — от 210 (КТ40) до -853 МПа (КТ22) при  $\sigma_{\text{ср}} = -345$  МПа,  $s = 321$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 484 МПа — от 94 (КТ21) до -390 МПа (КТ30) при  $\sigma_{\text{ср}} = -202$  МПа,  $s = 145$  МПа и  $N = 2$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 474 МПа — от 677 (КТ24) до 1151 МПа (КТ40) при  $\sigma_{\text{ср}} = 793$  МПа и  $s = 113$  МПа.

Температура в ПСК системы № 2 повышается с 248 до 896 °С на участке КТ1–КТ8, и понижается до 416 °С на участке КТ15–КТ20 (см. рис. 3, а). В ПСП этой системы температура повышается с 250 до 895 °С на участке КТ21–КТ28 и понижается до 428 °С на участке КТ35–КТ40 (см. рис. 3, б). При этом формы кривых напряжений для ПСК и ПСП существенно различаются.

В ПСК формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 695 МПа — от 325 (КТ15) до -370 МПа (КТ7) при  $\sigma_{\text{ср}} = 45$  МПа,  $s =$

= 192 МПа и  $N = 3$  (см. рис. 3, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 673 МПа — от 496 (КТ20) до -177 МПа (КТ14) при  $\sigma_{ср} = 106$  МПа,  $s = 217$  МПа и  $N = 5$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 551 МПа — от -119 (КТ1) до -670 МПа (КТ20) при  $\sigma_{ср} = -312$  МПа,  $s = 139$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 981 МПа — от 294 (КТ2) до 1275 МПа (КТ20) при  $\sigma_{ср} = 603$  МПа и  $s = 261$  МПа.

В ПСП формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , которые изменяются в диапазоне 1266 МПа — от 238 (КТ21) до -1028 МПа (КТ40) при  $\sigma_{ср} = -313$  МПа,  $s = 322$  МПа и  $N = 1$  (см. рис. 3, б). Диапазон изменения напряжений  $\sigma_{22}$  составляет 1068 МПа — от 210 (КТ40) до -858 МПа (КТ22) при  $\sigma_{ср} = -277$  МПа,  $s = 287$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 393 МПа — от 96 (КТ21) до -297 МПа (КТ25) при  $\sigma_{ср} = -169$  МПа,  $s = 114$  МПа и  $N = 2$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 691 МПа — от 462 (КТ32) до 1153 МПа (КТ40) при  $\sigma_{ср} = 659$  МПа и  $s = 195$  МПа.

Обобщенные показатели структурной неоднородности напряжений в ПСК и ПСП, а также характеристики напряженного состояния границы керамика – покрытие для систем № 1 и 2 под действием теплового потока приведены в табл. 1.

Анализ табличных данных показывает, что значения основных показателей неоднородности напряжений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  в ПСП выше, а напряжений  $\sigma_{12}$  (кроме  $s$  в системе № 1) и напряжений  $\sigma_i$  (кроме  $\sigma_{мин}$  и  $\sigma_{ср}$  в системах № 1 и 2) ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПСК. Отмечено, что в ПСК системы № 1

значение  $s$  для  $\sigma_i$  в 1,9 раза больше, чем в ПСП, для системы № 2 в 1,3 раза.

Установлено, что значения  $\sigma_{ср}$ ,  $\Sigma$  и  $s$  для  $\sigma_i$ , характеризующие напряженное состояние границы керамика – покрытие в системе № 2, превосходят аналогичные характеристики системы № 1 на 7, 15 и 40 % соответственно при практически

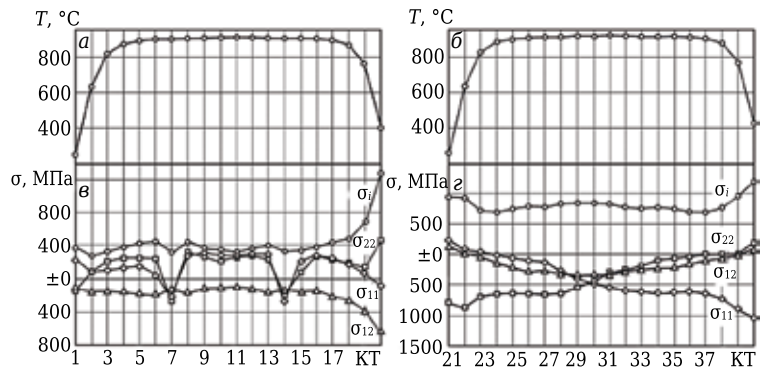


Рис. 2. Температура (а и б) и напряжения (в и г) в ПСК и ПСП системы № 1 под действием теплового потока

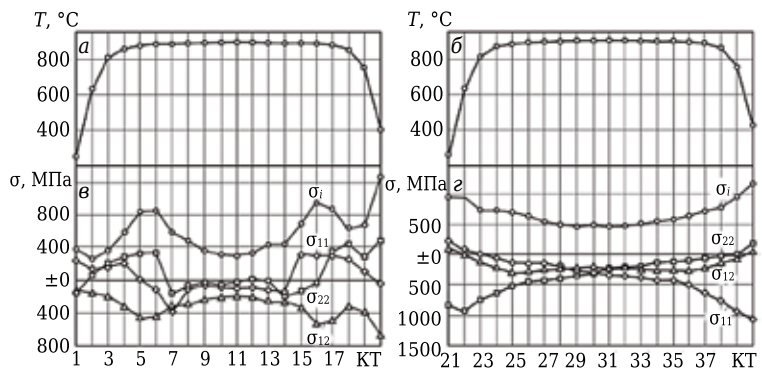


Рис. 3. Температура (а и б) и напряжения (в и г) в ПСК и ПСП системы № 2 под действием теплового потока

Таблица 1

Показатели	$\sigma_{11}$		$\sigma_{22}$		$\sigma_{12}$		$\sigma_i$		граница
	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	
<i>Система 1</i>									
$\Sigma$ , МПа	575	1264	715	1063	560	484	980	474	727
$\sigma_{макс}$ , МПа	321	-1027	456	-853	-677	-390	1272	1151	1212
$\sigma_{мин}$ , МПа	-254	237	-259	210	-117	94	292	677	485
$\sigma_{ср}$ , МПа	156	-394	172	-345	-203	-202	445	739	592
$N$	5	1	5	1	0	2	-	-	-
$s$ , МПа	169	350	177	321	129	145	213	113	163
<i>Система 2</i>									
$\Sigma$ , МПа	695	1266	673	1068	551	393	981	691	836
$\sigma_{макс}$ , МПа	-370	-1028	496	-858	-670	-297	1275	1153	1214
$\sigma_{мин}$ , МПа	325	238	-177	210	-119	96	294	462	378
$\sigma_{ср}$ , МПа	45	-313	106	-277	-312	-169	603	659	631
$N$	3	1	5	1	0	2	-	-	-
$s$ , МПа	192	322	217	287	139	114	261	195	228

одинаковых значениях  $\sigma_{\max}$  и меньших значениях  $\sigma_{\min}$ .

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием комбинированной нагрузки представлены на рис. 4. Видно, что кривые для аналогичных приграничных слоев разных систем имеют однотипный вид и их основное различие заключается в значениях  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$ .

В ПСК системы № 1 под действием комбинированной нагрузки формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 922 МПа — от 297 (КТ13) до -625 МПа (КТ20)  $\sigma_{cp} = 56$  МПа,  $s = 242$  МПа и  $N = 7$  (см. рис. 4, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 916 МПа — от 232 (КТ12) до -684 МПа (КТ19) при  $\sigma_{cp} = -154$  МПа,  $s = 261$  МПа и  $N = 5$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 958 МПа — от 404 (КТ11) до -554 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 177$  МПа,  $s = 227$  МПа и  $N = 1$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 665 МПа — от 413 (КТ1) до 1078 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 574$  МПа и  $s = 159$  МПа.

В ПСК системы № 2 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 995 МПа — от 377 (КТ15) до -618 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = -21$  МПа,  $s = 216$  МПа и  $N = 5$  (см. рис. 4, а). Напряжения

$\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 746 МПа — от 167 (КТ6) до -579 МПа (КТ19) при  $\sigma_{cp} = -178$  МПа,  $s = 212$  МПа и  $N = 4$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 1058 МПа — от 504 (КТ11) до -534 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 107$  МПа,  $s = 266$  МПа и  $N = 1$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 934 МПа — от 158 (КТ5) до 1092 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 529$  МПа и  $s = 246$  МПа.

В ПСП системы № 1 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 1824 МПа — от 253 (КТ21) до -1589 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = -409$  МПа,  $s = 457$  МПа и  $N = 1$  (см. рис. 4, б). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 1275 МПа — от 209 (КТ40) до -1066 МПа (КТ21) при  $\sigma_{cp} = -535$  МПа,  $s = 440$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 284 МПа — от 151 (КТ28) до 435 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 247$  МПа,  $s = 73$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 1264 МПа — от 599 (КТ33) до 1863 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 957$  МПа и  $s = 328$  МПа.

В ПСП системы № 2 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , которые изменяются в диапазоне 1843 МПа — от 254 (КТ21) до -1589 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = -332$  МПа,  $s = 436$  и  $N = 1$  (см. рис. 4, б).

Диапазон изменения напряжений  $\sigma_{22}$  составляет 1516 МПа — от 209 (КТ40) до -1307 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = -486$  МПа,  $s = 409$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 289 МПа — от 147 (КТ36) до 436 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 253$  МПа,  $s = 95$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 1426 МПа — от 437 (КТ35) до 1863 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 864$  МПа и  $s = 379$  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 комбинированной нагрузки приведены в табл. 2.

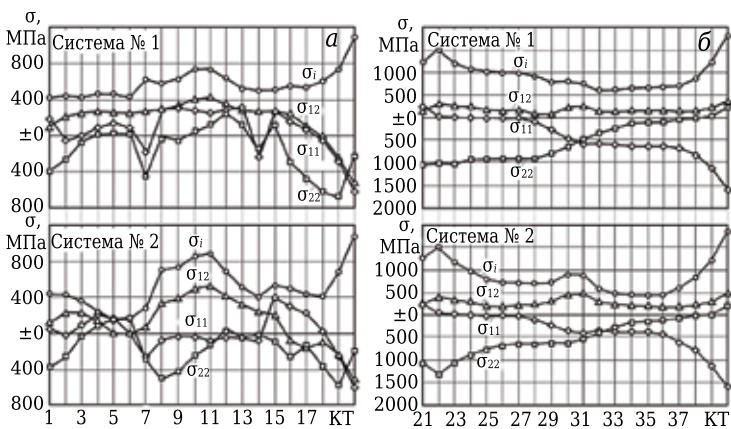


Рис. 4. Напряжения в ПСК (а) и ПСП (б) разных систем под действием комбинированной нагрузки

Таблица 2

Показатели	$\sigma_{11}$		$\sigma_{22}$		$\sigma_{12}$		$\sigma_i$		граница
	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	ПСК	ПСП	
<i>Система 1</i>									
$\Sigma$ , МПа	922	1824	916	1275	958	284	665	1264	965
$\sigma_{\max}$ , МПа	-625	-1589	-684	-1066	-554	435	1078	1863	1471
$\sigma_{\min}$ , МПа	297	253	232	209	404	151	413	599	506
$\sigma_{cp}$ , МПа	56	-409	-154	-535	177	247	574	957	766
$N$	7	1	5	1	1	0	-	-	-
$s$ , МПа	242	457	261	440	227	73	159	328	244
<i>Система 2</i>									
$\Sigma$ , МПа	995	1843	746	1516	1058	289	934	1426	1180
$\sigma_{\max}$ , МПа	-618	-1589	-579	-1307	-534	436	1092	1863	1478
$\sigma_{\min}$ , МПа	377	254	167	209	504	147	158	437	298
$\sigma_{cp}$ , МПа	-21	-332	-178	-486	107	253	529	864	697
$N$	5	1	4	1	1	0	-	-	-
$s$ , МПа	216	436	212	409	266	95	246	379	312

Анализ этих данных показывает, что значения основных показателей неоднородности напряжений  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в ПСП выше, а  $\sigma_{12}$  (кроме  $\sigma_{cp}$ ) ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПСК. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2. Показатели  $\Sigma$  и  $s$ , характеризующие напряженное состояние границы керамика – покрытие в системе № 2, превосходят аналогичные характеристики системы № 1 на 22 и 28 % соответственно при практически равных значениях  $\sigma_{\max}$  и меньших значениях  $\sigma_{cp}$  и  $\sigma_{\min}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены основные закономерности формирования напряжений в приграничных слоях нитридной керамики и покрытия из нитрида титана под действием теплового потока и комбинированной нагрузки. Установлено, что под действием теплового потока в системе с зерном из нитрида кремния характеристики, определяющие напряженное состояние границы керамика – покрытие, меньше по сравнению с аналогичными показате-

лями системы с зерном из карбида титана на 7, 15 и 40 % соответственно при практически одинаковых значениях  $\sigma_{\max}$  и меньших значениях  $\sigma_{\min}$ . Под действием комбинированной нагрузки в системе с зерном из нитрида кремния значения характеристик, определяющих напряженное состояние границы, меньше аналогичных характеристик системы с зерном из карбида титана на 22 и 28 % соответственно при практически равных значениях  $\sigma_{\max}$  и меньших значениях  $\sigma_{cp}$  и  $\sigma_{\min}$ . 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 теплового потока и комбинированной нагрузки на участках контакта зерен  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с покрытием  $\text{TiN}$ , чем на участках контакта зерен  $\text{TiC}$  с таким же покрытием.

\* \* \*

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

## Библиографический список

1. **Волосова, М. А.** Инновационные исследования МГТУ «СТАНКИН» в области создания материалов с новыми свойствами на основе методов атомно-молекулярного конструирования / М. А. Волосова // Инновации. — 2015. — № 8 (202). — С. 61–67.
2. **Рогов, В. А.** Новые материалы в машиностроении : уч. пособие / В. А. Рогов, В. В. Соловьев, В. В. Копылов. — М. : РУДН, 2008. — 324 с.
3. **Pakuła, D.** Structure and properties of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nitride ceramics with hard wear resistant coatings / D. Pakuła, L. A. Dobrzanski, K. Gołombek [et al.] // J. Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 157/158. — P. 388–393.
4. **Гаршин, А. П.** Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семенов. — М. : Научтехлитиздат, 2003. — 384 с.
5. **Berroth, K.** Silicon nitride ceramics for product and process innovations / K. Berroth // Advances in Science and Technology. — 2010. — Vol. 65. — P. 70–77.
6. **Dobrzański, L. A.** Structure and properties of the wear resistant coatings obtained in the PVD and CVD processes on tool ceramics / L. A. Dobrzański, D. Pakuła // Materials Science Forum. — 2006. — Vol. 513. — P. 119–134.
7. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
8. **Кузин, В. В.** 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.
9. **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.
10. **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.
11. **Верещака, А. А.** Исследование режущих свойств и механизма изнашивания керамического лезвийного инструмента с наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями / А. А. Верещака, Е. С. Сотова, А. Д. Батако [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 6. — С. 699–707.
12. **Кузин, В. В.** Tool life and wear mechanism of coated  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic tools in turning grey cast iron / V. Kuzin, S. Grigoriev // Key Engineering Materials. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.
13. **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.
14. **Волосова, М. А.** 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.
15. **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.
16. **Волосова, М. А.** 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.

14. **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.

15. **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.

16. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

**Kuzin, V. V.** Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

17. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton, D.

Batako // Proceedings of the 37th International MATADOR 2012 Conference. — 2013. — P. 181–184.

18. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

**Kuzin, V. V.** Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2. Microlevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov // J. Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.

19. **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.

20. **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.

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

**Grigoriev, 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.

22. **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 17.05.16

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

The World Conference on Carbon: Common fundamentals, remarkably versatile applications

# CARBON 2016

July 10–15

The Penn Stater Conference Center Hotel, State College, Pennsylvania, USA

**Тематика:**

- Наночастицы углерода
- Активированный уголь
- Гранулированные углеродные материалы
- Углеродные волокна и композиты
- Специальные формы углерода
- Ядерный графит
- Хранилище энергии
- Природный графит
- Пиролиз
- Физические и химические свойства и процессы
- Методология




[carbon.outreach.psu.edu](http://carbon.outreach.psu.edu)