

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

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСА ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРАНИЦЫ КЕРАМИКА – ПОКРЫТИЕ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭТОЙ СИСТЕМЫ

Определена чувствительность предложенного комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы. Установлено, что чувствительность комплекса зависит от условий внешнего нагружения. Рекомендовано применение комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие при проектировании керамических изделий с покрытием.

**Ключевые слова:** керамика, покрытие, приграничный слой, напряженное состояние.

### ВВЕДЕНИЕ

Современная методология проектирования керамических изделий для разных областей применения, основанная на интуитивном подходе к их конструктивному оформлению, не способна обеспечить требуемые показатели надежности этих изделий [1–4]. Отсутствуют инженерные методы расчета керамических изделий, учитывающие специфику их напряженного состояния и разрушения в определенных условиях эксплуатации [5]. Еще более проблемным является процесс проектирования керамических изделий с одно- и многослойными покрытиями [6–9]. Функциональные покрытия, залечивающие поверхностный слой керамики, значительно усложняют напряженное состояние и процесс разрушения керамических изделий [10–13]. В частности, различия в свойствах структурных элементов керамики и покрытия приводят к формированию сложного напряженного состояния на их границе, в результате чего в этой локальной области образуются структурные дефекты и зарождаются трещины [14, 15]. Эти трещины оказывают негативное влияние на надежность керамических изделий при эксплуатации [16]. По этой причине важно иметь метод анализа напряженного состояния границы керамика – покрытие на этапе проектирования керамических деталей.

В работе [17] предложен комплекс характеристик, позволяющий оценить напряженное со-

стояние границы керамика — покрытие. Однако чувствительность этого комплекса к изменению свойств элементов этой системы не изучена, что не позволяет его рекомендовать при проектировании керамических изделий с покрытием. Актуальность решения этой задачи определяется тем, что при проектировании керамических изделий с покрытиями в качестве исходных параметров задаются свойства элементов системы керамика – покрытие и данные по состоянию технологической среды [18]. Причем незначительное изменение значений исходных параметров может существенно повлиять на проектное решение, зависящее от целого ряда условий, в том числе от напряженного состояния границы керамика – покрытие [19].

Учитывая эти обстоятельства, в настоящей работе поставлена цель — оценить чувствительность предложенного комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы на примере керамики на основе нитрида кремния и однослойного покрытия из карбида и нитрида титана. Для достижения этой цели систематизированы результаты численных экспериментов по исследованию напряженного состояния границы керамика – покрытие, выполненных как в настоящей работе, так и ранее опубликованных статьях [17, 20, 21].

### МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сформированная модель исследования включает первоначальное проведение численных экспериментов по расчету напряжений



В. В. Кузин  
E-mail: kyzena@post.ru

Структурный элемент	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\mu$	Температурный коэффициент линейного расширения (20–1500 °С) $\alpha \cdot 10^6$ , 1/град	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·град)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,20	300	0,25	3,20	1001,7 $T^{0,63}$
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,90	250	0,22	7,90	686,1 $T^{0,82}$
TiC	4,90	484	0,22	7,95	23,2 $e^{0,0002T}$
TiN	5,44	440	0,25	9,30	36,6 $e^{0,00045T}$

$\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  ( $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 4\sigma_{12}^2}$ ) в поверхностном слое керамики (ПСК) на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и поверхностного слоя покрытия (ПСП) из TiC. С использованием результатов расчетов определены следующие характеристики неоднородности напряжений в ПСК и ПСП: наибольшее  $\sigma_{\max}$ , наименьшее  $\sigma_{\min}$ , среднее  $\sigma_{\text{ср}}$  значения; диапазон изменения  $\Sigma$ ; стандартное отклонение  $s$  и число  $N$  изменения знака нормальных ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ) и касательных ( $\sigma_{12}$ ) напряжений, а также интенсивности напряжений  $\sigma_i$ ; в выборке из 20 контрольных точек (КТ). Затем с использованием этих данных определены следующие характеристики границы керамика на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – TiC-покрытие:  $\sigma_{\max}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\min}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$ ,  $\Sigma^{\text{ГР}}$  и  $s^{\text{ГР}}$  рассчитанными как среднее арифметическое  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$ ,  $\Sigma$  и  $s$  значений интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в ПСК и ПСП.

На завершающем этапе исследования проанализирована чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границ керамика на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – TiC-покрытие и керамика на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – TiN-покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы (см. таблицу). Этот комплекс включает следующие характеристики:  $\sigma_{\max}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\min}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$ ,  $\Sigma^{\text{ГР}}$  и  $s^{\text{ГР}}$ .

Моделирование выполняли в автоматизированной системе термо-прочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [22], созданной на основе построенных микроструктурной и математической моделей [23, 24]. Использовали расчетную схему, приведенную в [21], и две системы: в системе № 1 зерно и матрица были выполнены из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а межзеренная фаза — из Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; а в системе № 2 зерно — из TiC, межзеренная фаза — из Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и матрица — из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Эту конструкцию нагружали тепловым потоком и комбинированной нагрузкой (тепловой поток, сосредоточенная и распределенная силы). Для анализа структурной неоднородности напряжений в ПСК и ПСП, а также напряженного состояния границы керамика – покрытие использовали метод контрольных точек [25]. В ПСК и ПСП выделили по двадцать КТ (КТ1–КТ20 в ПСК и КТ21–КТ40 в ПСП).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате расчета температур в ПСК и ПСП разных систем под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (коэффициент теплоотвода с поверхностей, свободных от теплового потока, в

окружающую среду  $h = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·град) установлено, что кривые температур в ПСК и ПСП обеих систем имеют одинаковый вид. В качестве примера «типичной кривой», на рис. 1 показана кривая изменения температуры в ПСК системы № 1. Видно, что эта кривая состоит из трех участков: на первом участке температура резко увеличивается, во втором – температура практически не изменяется и на третьем участке – температура резко уменьшается. Проанализируем количественные характеристики теплового состояния ПСК и ПСП обеих систем.

Температура в ПСК системы № 2 увеличивается с 265 до 1112 °С на участке КТ1–КТ8, а на участке КТ15–КТ20 — уменьшается до 468 °С. В ПСП этой системы температура увеличивается с 265 до 1127 °С на участке КТ21–КТ28, а на участке КТ35–КТ40 — уменьшается до 489 °С. Разница между наибольшими значениями температур в ПСК (1116 °С) и ПСП (1135 °С) системы № 2 составляет 1,7 %.

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП разных систем под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> показаны на рис. 2. Формы кривых напряжений для ПСК и ПСП обеих систем существенно отличаются. Например, напряжения  $\sigma_{11}$  в ПСК системы № 1 на участках КТ9–КТ13 и КТ15–КТ19 являются растягивающими, а в ПСП на симметричных участках КТ29–КТ33 и КТ35–КТ39 сжимающими. Напряжения  $\sigma_{22}$  в ПСК системы № 1 на участках КТ2–КТ6 и КТ8–КТ13 являются растягивающими, а в ПСП на симметричных участках КТ22–КТ26 и КТ28–КТ33 сжимающими. Следует отметить пиковое изменение значений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  в КТ7 и КТ14 ПСК системы № 1, в ПСП аналогичные пики на кривых отсутствуют.

В ПСК керамики системы № 1 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 477 МПа — от 242 МПа (КТ1) до -235 МПа (КТ14) при среднем значении  $\sigma_{\text{ср}} = 87$  МПа, стандартном отклонении  $s = 122$  МПа и числе изменений знака  $N = 3$  (см. рис. 2, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 694 МПа — от 460 (КТ20) до -234 МПа (КТ7) при  $\sigma_{\text{ср}} = 107$  МПа,  $s = 144$  МПа и  $N = 3$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 553 МПа — от -102 (КТ11) до -655 МПа (КТ20) при  $\sigma_{\text{ср}} = -177$  МПа,  $s = 124$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 1031 МПа — от 205 МПа (КТ3) до 1236 МПа (КТ20) при  $\sigma_{\text{ср}} = 351$  МПа и  $s = 226$  МПа.

В ПСП системы № 1 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 1263 МПа — от 248 (КТ21) до -1015 МПа (КТ40) при

$\sigma_{cp} = -276$  МПа,  $s = 299$  МПа и  $N = 1$  (см. рис. 2, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 969 МПа — от 203 (КТ40) до -766 МПа (КТ21) при  $\sigma_{cp} = -239$  МПа,  $s = 260$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 354 МПа — от 96 (КТ21) до -258 МПа (КТ30) при  $\sigma_{cp} = -142$  МПа,  $s = 101$  МПа и  $N = 2$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 669 МПа — от 464 (КТ24) до 1133 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 583$  МПа и  $s = 183$  МПа.

В ПСК системы № 2 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 547 МПа — от 251 (КТ1) до -296 МПа (КТ7) при  $\sigma_{cp} = -7$  МПа,  $s = 166$  МПа и  $N = 3$  (см. рис. 2, б). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 660 МПа — от 501 (КТ20) до -159 МПа (КТ7) при  $\sigma_{cp} = 47$  МПа,  $s = 195$  МПа и  $N = 3$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 510 МПа — от -138 (КТ1) до -648 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = -261$  МПа,  $s = 122$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 948 МПа — от 292 (КТ11) до 1240 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 504$  МПа и  $s = 223$  МПа.

В ПСП формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , которые изменяются в диапазоне 1265 МПа — от 249 (КТ21) до -1016 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = -222$  МПа,  $s = 289$  МПа и  $N = 1$  (см. рис. 2, б). Диапазон изменения напряжений  $\sigma_{22}$  составляет 974 МПа — от 204 (КТ40) до -770 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = -196$  МПа,  $s = 249$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 328 МПа — от 99 (КТ21) до -229 МПа (КТ25) при  $\sigma_{cp} = -122$  МПа,  $s = 85$  МПа и  $N = 2$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 853 МПа — от 282 (КТ31) до 1153 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 496$  МПа и  $s = 242$  МПа.

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием комбинированной нагрузки (сосредоточенная сила  $F = 0,1$  Н, распределенная сила  $P = 4,0 \cdot 10^8$  Па и тепловой поток  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>) показаны на рис. 3. Видно, что кривые для ПСК разных систем различаются. Значения напряжений  $\sigma_i$  в ПСК системы № 1 на участке КТ1 – КТ8 практически не изменяются, а в ПСК системы № 2 на аналогичном участке зафиксировано сначала резкое уменьшение значений  $\sigma_i$  от 454 до 85 МПа (КТ1 – КТ6), а затем резкое увеличение от 85 до 793 МПа (КТ6 – КТ8). Кривые для ПСП разных систем имеют однотипный вид и отличаются значениями  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$ .

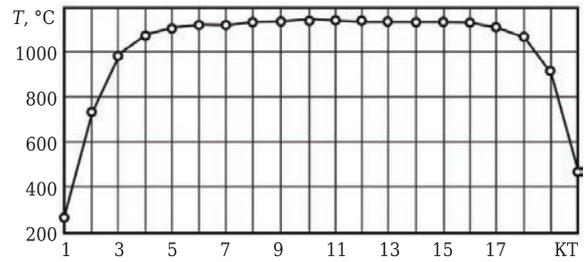


Рис. 1. Кривые распределения температуры в ПСК и ПСП разных систем под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> ( $h = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·град)

В ПСК системы № 1 под действием комбинированной нагрузки формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 751 МПа — от 139 (КТ9) до -612 МПа (КТ20)  $\sigma_{cp} = -42$  МПа,  $s = 187$  МПа и  $N = 7$  (см. рис. 3, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 775 МПа — от 116

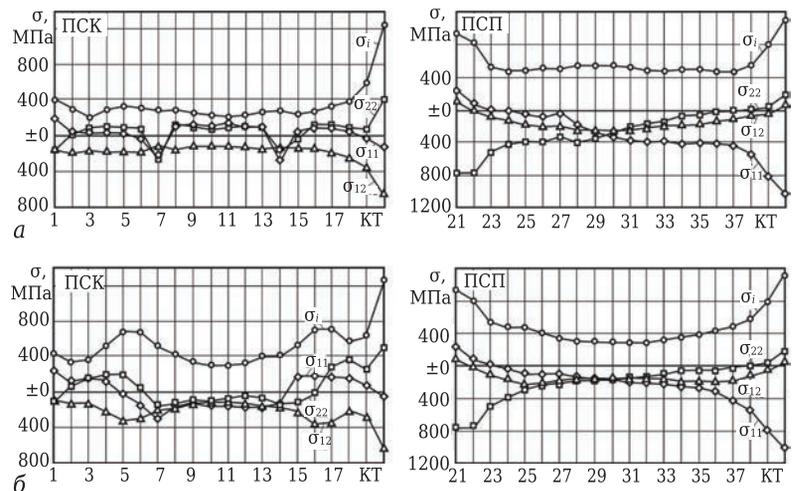


Рис. 2. Напряжения в ПСК и ПСП систем № 1 (а) и № 2 (б) под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>

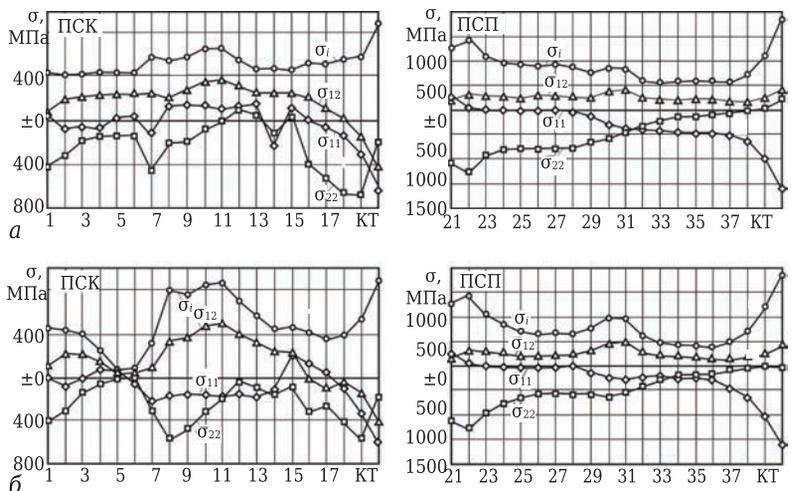


Рис. 3. Напряжения в ПСК и ПСП систем № 1 (а) и № 2 (б) под действием комбинированной нагрузки  $F = 0,1$  Н,  $P = 4,0 \cdot 10^8$  Па и  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>

(КТ12) до -659 МПа (КТ19) при  $\sigma_{cp} = -215$  МПа,  $s = 228$  МПа и  $N = 3$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 807 МПа — от 388 (КТ11) до -419 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 190$  МПа,  $s = 228$  МПа и  $N = 1$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 466 МПа — от 438 (КТ3) до 904 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 550$  МПа и  $s = 112$  МПа.

В ПСП системы № 1 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 1885 МПа — от 268 (КТ21) до -1617 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = -313$  МПа,  $s = 431$  МПа и  $N = 1$  (см. рис. 3, а). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 1468 МПа — от 214 (КТ40) до -1254 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = -473$  МПа,  $s = 414$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 231 МПа — от 206 (КТ37) до 437 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 295$  МПа,  $s = 66$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma$ , изменяется в диапазоне 1333 МПа — от 559 (КТ33) до 1892 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 907$  МПа и  $s = 339$  МПа.

В ПСК системы № 2 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 819 МПа — от 212 (КТ15) до -607 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = -90$  МПа,  $s = 177$  МПа и  $N = 4$  (см. рис. 3, б). Напряжения  $\sigma_{22}$  изменяются в диапазоне 601 МПа — от 19 (КТ6) до -582 МПа (КТ8) при  $\sigma_{cp} = -241$  МПа,  $s = 184$  МПа и  $N = 2$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 919 МПа — от 499 (КТ11) до -420 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 142$  МПа,  $s = 230$  МПа и  $N = 1$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 829 МПа — от 80 (КТ5) до 909 МПа (КТ20) при  $\sigma_{cp} = 505$  МПа и  $s = 246$  МПа.

В ПСП системы № 2 формируются напряжения  $\sigma_{11}$ , которые изменяются в диапазоне 1886 МПа — от 268 (КТ21) до -1618 МПа (КТ40) при

$\sigma_{cp} = -250$  МПа,  $s = 427$  и  $N = 1$  (см. рис. 3, б). Диапазон изменения напряжений  $\sigma_{22}$  составляет 1271 МПа — от 26 (КТ40) до -1245 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = -435$  МПа,  $s = 365$  МПа и  $N = 1$ . Напряжения  $\sigma_{12}$  изменяются в диапазоне 345 МПа — от 173 (КТ37) до 518 МПа (КТ31) при  $\sigma_{cp} = 294$  МПа,  $s = 98$  МПа и  $N = 0$ . Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 1496 МПа — от 397 (КТ36) до 1893 МПа (КТ40) при  $\sigma_{cp} = 842$  МПа и  $s = 383$  МПа.

Результаты оценки чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границ керамика на основе  $Si_3N_4$  – TiC-покрытие и керамика на основе  $Si_3N_4$  – TiN-покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы под действием разных нагрузок показаны на рис. 4–7. На диаграммах комплекс характеристик  $\sigma_{max}^{гп}$ ,  $\sigma_{min}^{гп}$ ,  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\Sigma^{гп}$  и  $s^{гп}$  обозначен как НСГ — напряженное состояние границы.

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие под действием сосредоточенной силы  $F = 0,1$  Н, приложенной под углом  $45^\circ$  показана на рис. 4. Установлено, что значения  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{max}^{гп}$ ,  $\sigma_{min}^{гп}$ ,  $\Sigma^{гп}$  и  $s^{гп}$ , характеризующие напряженное состояние границы керамика – TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 1,4, 7, 2, 8 и 4 % соответственно, чем в системе № 2. Значения  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{max}^{гп}$  и  $\Sigma^{гп}$  для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 3; 5 и 6 % соответственно, чем в системе № 2. Значения  $\sigma_{min}^{гп}$  и  $s^{гп}$  в этих системах практически не отличаются.

В системе № 1 значения  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{max}^{гп}$  и  $\Sigma^{гп}$  для границы керамика – TiC-покрытие меньше на 4, 2 и 2 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие той же системы при практически одинаковых значениях  $\sigma_{min}^{гп}$  и  $s^{гп}$ . В системе № 2 значения  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{max}^{гп}$ ,  $\Sigma^{гп}$  и  $s^{гп}$  для границы керамика – TiC-покрытие меньше на 2, 4, 4 и 3 %, чем для границы «керамика – TiN-покрытие», при практически одинаковых значениях  $\sigma_{min}^{гп}$ .

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие под действием распределенной силы  $P = 4,0 \cdot 10^8$  Па показана на рис. 5. Видно, что значения  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{max}^{гп}$ ,  $\Sigma^{гп}$  и  $s^{гп}$  для границы керамика – TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 1,5, 8, 12 и 18 % соответственно, чем в системе № 2 при практически одинаковых значениях  $\sigma_{min}^{гп}$ . Значения  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{max}^{гп}$ ,  $\Sigma^{гп}$  и  $s^{гп}$  для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 1,4, 8, 11 и 15,5 % соответственно, чем в системе № 2 при практически одинаковых значениях  $\sigma_{min}^{гп}$ .

Значения  $\sigma_{max}^{гп}$  и  $\Sigma^{гп}$  для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 больше на 2 и 2 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие, при практически равных значениях  $\sigma_{cp}^{гп}$ ,  $\sigma_{min}^{гп}$  и  $s^{гп}$ . В системе № 2 значения  $\sigma_{max}^{гп}$  и  $\Sigma^{гп}$  для границы керамика – TiC-покрытие больше на 1,5 и 2 % соответственно, чем для границы керами-

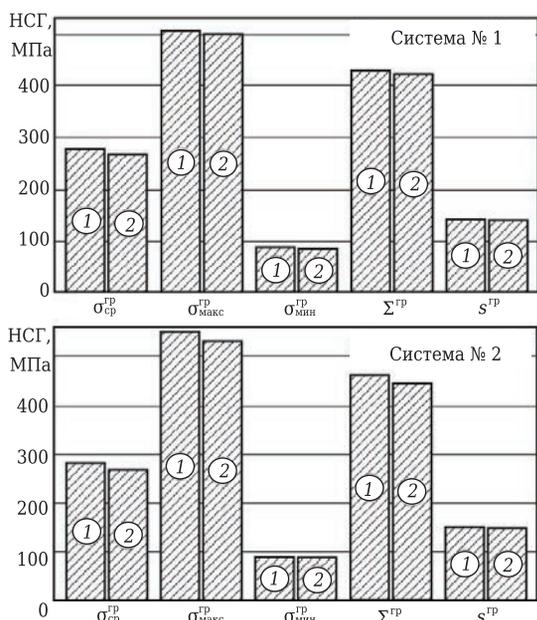
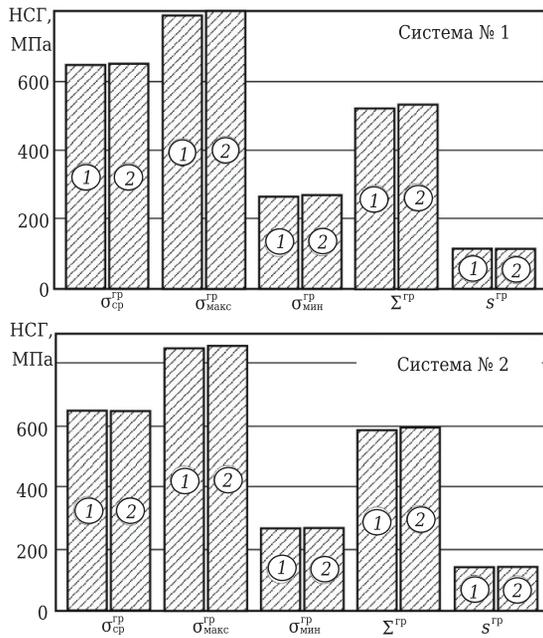


Рис. 4. Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием сосредоточенной силы  $F = 0,1$  Н для разных систем: 1 — TiN-покрытие 2 — TiC-покрытие



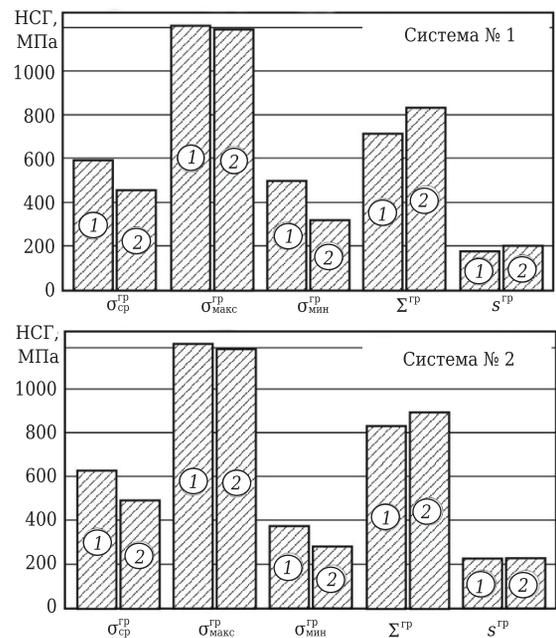
**Рис. 5.** Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием распределенной силы  $P = 4,0 \cdot 10^8$  Па для разных систем: 1 — TiN-покрытие 2 — TiC-покрытие

ка — TiN-покрытие, при практически одинаковых значениях  $\sigma_{ср}^{гр}$ ,  $\sigma_{мин}^{гр}$  и  $s^{гр}$ .

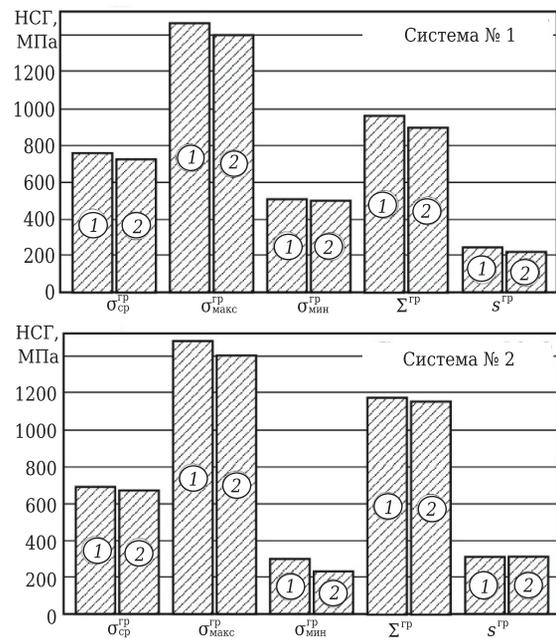
Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (коэффициент теплоотвода  $h = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·град) показана на рис. 6. Выявлено, что значения  $\sigma_{ср}^{гр}$ ,  $\Sigma^{гр}$  и  $s^{гр}$ , характеризующие напряженное состояние границы керамика — TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 6, 13 и 29 % соответственно, чем в системе № 2, при практически одинаковых значениях  $\sigma_{макс}^{гр}$  и больших на 28 % значениях  $\sigma_{мин}^{гр}$ . Значения  $\sigma_{ср}^{гр}$ ,  $\Sigma^{гр}$  и  $s^{гр}$  для границы керамика — TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 7, 6 и 12 % соответственно, чем в системе № 2, при практически одинаковых значениях  $\sigma_{макс}^{гр}$  и больших на 17 % значениях  $\sigma_{мин}^{гр}$ .

Значения  $\sigma_{ср}^{гр}$ ,  $\sigma_{макс}^{гр}$ ,  $\sigma_{мин}^{гр}$  для границы керамика — TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 21, 2 и 31 % соответственно, чем для границы керамика — TiN-покрытие. Значения  $\Sigma^{гр}$  и  $s^{гр}$  для границы керамика — TiC-покрытие в системе № 1 больше на 17 и 26 %, чем для границы керамика — TiN-покрытие. В системе № 2 значения  $\sigma_{ср}^{гр}$ ,  $\sigma_{макс}^{гр}$ ,  $\sigma_{мин}^{гр}$  для границы керамика — TiC-покрытие меньше на 21, 4 и 24 % соответственно, чем для границы керамика — TiN-покрытие, при больших значениях  $\Sigma^{гр}$  и  $s^{гр}$  на 8 и 2 % соответственно.

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием комбинированной нагрузки (сосредоточенная сила  $F = 0,1$  Н, распределенная сила  $P = 4,0 \cdot 10^8$  Па и тепловой поток



**Рис. 6.** Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием теплового потока  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> ( $h = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·град) для разных систем: 1 — TiN-покрытие 2 — TiC-покрытие



**Рис. 7.** Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием комбинированной нагрузки  $F = 0,1$  Н,  $P = 4,0 \cdot 10^8$  Па и  $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> для разных систем: 1 — TiN-покрытие; 2 — TiC-покрытие

$Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> при коэффициенте теплоотвода  $h = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·град) показана на рис. 7. Установлено, что значения  $\Sigma^{гр}$  и  $s^{гр}$  для границы керамика — TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 18 и 22 % соответственно, чем в системе № 2 при практически одинаковых значениях  $\sigma_{макс}^{гр}$

на 10 и 70 % значениях  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$  и  $\sigma_{\text{мин}}^{\text{ГР}}$  соответственно. Значения  $\Sigma^{\text{ГР}}$  и  $s^{\text{ГР}}$  для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 23 и 28 % соответственно, чем в системе № 2, при практически одинаковых значениях  $\sigma_{\text{макс}}^{\text{ГР}}$ . Значения  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$  и  $\sigma_{\text{мин}}^{\text{ГР}}$  больше на 8 % и в 2,1 раза соответственно в системе № 1, чем в системе № 2.

Значения  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\text{макс}}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\text{мин}}^{\text{ГР}}$ ,  $\Sigma^{\text{ГР}}$  и  $s^{\text{ГР}}$  для границы «керамика – TiC-покрытие» в системе № 1 меньше на 5, 5, 1,5, 7 и 7 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие. В системе № 2 значения  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\text{макс}}^{\text{ГР}}$ ,  $\sigma_{\text{мин}}^{\text{ГР}}$  и  $\Sigma^{\text{ГР}}$  для границы керамика – TiC-покрытие меньше на 3, 5, 20 и 1,5 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие при практически одинаковых значениях  $s^{\text{ГР}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выявлена достаточно высокая чувствительность предложенного комплекса характеристик на-

пряженного состояния границы керамика – покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы. Чувствительность этого комплекса зависит от условий внешнего нагружения. Наибольшая чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие зафиксирована в условиях действия комбинированной нагрузки, а наименьшая — в условиях действия сосредоточенной силы. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование предложенного комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие для формирования рациональных решений при проектировании керамических изделий с 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. **Fahrenheitz, William G.** Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environments / *William G. Fahrenheitz, Greg E. Hilmas* // Scripta Mater. — 2017. — Vol. 129. — P. 94–99.
2. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
3. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / *V. V. Kuzin* // Refract. Indust. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
4. **Kern, Frank.** 10 — Design of ceramic materials for orthopedic devices / *Frank Kern, Anke Bernstein, Andreas Killinger* // Advances in Ceramic Biomaterials. — 2017. — P. 331–353.
5. **Кузин, В. В.** Проектирование технологических процессов изготовления деталей из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики с учетом требуемой дефектности кромок / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 65–68.
6. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / *V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova, M. Fedorov* // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.
7. **Kumar, Vijay.** Processing and design methodologies for advanced and novel thermal barrier coatings for engineering applications / *Vijay Kumar, Balasubramanian Kandasubramanian* // Particuology. — 2016. — Vol. 27. — P. 1–28.
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. **Su, Honghong.** Thermal shock resistance of alumina ceramics enhanced by nanostructured conformal coatings using metal-organic frameworks / *Honghong Su, Guohui Hou, Zhiqiang Cheng* [et al.] // Scripta Mater. — 2016. — Vol. 119. — P. 38–42.

9. **Vereschaka, A. A.** Specifics of application of cutting ceramics with functional coating in turning of high-strength materials / *A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, B. Y. Mokritskii* [et al.] // Mater. Sci. Forum. — 2016. — Vol. 857. — P. 221–227.
10. **Kuzin, V.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / *V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov* // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 752/753. — P. 402–406.
11. **Chaix, J. M.** Quantitative analysis of microstructure and modeling of sintering / *J. M. Chaix* // Mater. Sci. Forum. — 2009. — Vol. 624. — P. 1–18.
12. **Волосова, М. А.** Исследование и систематизация поверхностных и объемных дефектов инструментальной керамики и основных направлений ее совершенствования / *М. А. Волосова* // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2015. — № 5 (125). — С. 3–8.
13. **Zou, C. B.** Establishment of the low defect ceramic cutting tool database / *C. B. Zou, C. Z. Huang, B. Zou, Y. H. Fei* [et al.] // Key Engineering Materials. — 2014. — Vols. 589–590. — P. 357–360.
14. **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 2012 Conference. — 2013. — P. 181–184.
15. **Yang, Yao.** Numerical investigation on the bond strength of a SiCN-based multi-layer coating system / *Yao Yang, Ningbo Liao, Miao Zhang* [et al.] // J. Alloys Compd. — 2017. — Vol. 710. — P. 468–471.
16. **Кузин, В. В.** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 39–43.
17. **Kuzin, V. V.** Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.
17. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием сило-

вых 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. Y. Fedorov // Refract. Industr. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 192–198.

18. **Григорьев, С. Н.** Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80.

**Grigor'ev, S. N.** Influence of ceramic properties on the stress-strain state of a plate in steady heat conduction / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. N. Morgan, A. D. Batako // Russian Engineering Research. — 2012, — Vol. 32, № 4. — P. 374–379.

19. **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 // Refract. Industr. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

20. **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. Y. Fedorov // Refract. Industr. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 308–312.

21. **Кузин, В. В.** Влияние параметров силового воздействия на неоднородность напряжений на границе между нитридной керамикой и TiC-покрытием / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2017. — № 10. — С. 54–59.

22. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочувствительных 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.

23. **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.

24. **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.

25. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 14.11.17

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Tecnargilla 2018** — международная выставка технологий и оборудования для производства керамики и кирпича



# THE FUTURE OF CERAMICS

24–28 сентября 2018 г. г. Римини, Италия

- Оборудование и методы производства
- Сырье и вспомогательные вещества
- Изделия и оборудование для художественной обработки
- Архитектурная и сантехническая плитка
- Лабораторное, измерительное и регулировочное оборудование
- Инновационные продукты

TECNARGILLA

KROMATECH



CLAYTECH

<http://en.tecnargilla.it/>