Д. т. н. **В. В. Кузин**[1] (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**[1], к. т. н. **Предраг Дашич**[2]

[1] *ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия*

[2] *SaTCIP Publisher Ltd, г. Врнячка Баня, Сербия*

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ СЛОЕВ TiC/TiN-ПОКРЫТИЯ, НАНЕСЕННОГО НА НИТРИДНУЮ КЕРАМИКУ

Установлены основные закономерности термомеханических процессов на границе слоев нанесенного на нитридную керамику TiC/TiN-покрытия, протекающих под воздействием тепловых и комбинированных нагрузок. Выявлено влияние материала основного структурного элемента керамики на температуру и напряжения, формируемые в контактирующих подслоях TiC/TiN-покрытия под действием этих нагрузок.

Ключевые слова: *керамика, покрытие, слой, граница, напряжения, тепловой поток, комбинированная нагрузка.*

ВВЕДЕНИЕ

Реализация принципов инженерии поверхности при создании инновационных керамических инструментов требует детального описания поведения хрупкого материала с поверхностными функциональными слоями в разных условиях [1, 2]. Для выявления особенностей термомеханических процессов, протекающих в этих материалах под действием силовых и тепловых нагрузок, построены микроструктурная и математическая модели керамической пластины с многослойным покрытием, на основе которых создана автоматизированная система термопрочностных расчетов [3–5]. Их практическое использование позволило выявить закономерности влияния состава покрытия на напряженно-деформированное состояние структурных элементов оксидной и нитридной керамики, а также границы между покрытием и керамикой [6–10]. Установлено, что рельеф поверхности керамики и толщина однослойного покрытия существенно влияют на напряженное состояние поверхностного слоя керамики и границы «керамика–покрытие» под действием силовой и тепловой нагрузки [11–14]. Влияние структуры нитридной керамики на неоднородность напряжений на границе «керамика – покрытие» при термомеханическом воздействии оценено в работе [15]. На основе результатов математического моделирования термомеханических процессов в слоисто-неоднородном материале разработан метод проектирования керамических инструментов с покрытиями [16, 17]. Применение этого метода позволило решить задачу создания керамических инструментов нового поколения для определенных условий эксплуатации [18, 19]. Опытная эксплуатация этих инструментов доказала их высокую эффективность и выявила существенный недостаток — высокую вероятность разрушения многослойных покрытий в результате зарождения и роста трещин на границе его слоев [20, 21].

Одной из причин этого вида разрушения многослойных покрытий на керамике могут быть экстремально высокие напряжения, приводящие к зарождению и накоплению структурных дефектов на границе слоев из-за существенной разницы в свойствах тугоплавких материалов и технологических факторов [22]. Экспериментальные методы не позволяют подтвердить или опровергнуть эту гипотезу [23]. Поэтому в работе поставлена цель — с использованием математического моделирования изучить термомеханические процессы на границе между слоями TiC/TiN-покрытия на нитридной керамике при совместном воздействии тепловых и силовых нагрузок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование теплового и напряженного состояния границы между слоями двухслойного TiC/TiN-покрытия выполнено по методике и с использованием расчетной схемы, приведенной в [24]. Проведены две серии численных экспериментов, в которых исследованы две системы

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

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 численных экспериментов к свободной поверхности конструкции прикладывали тепловой поток $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 при теплоотводе с поверхностей, свободных от теплового потока, в окружающую среду с коэффициентом $h = 10^5$ Вт/(м^2·град). Во второй серии численных экспериментов прикладываемая внешняя нагрузка включала комбинацию сил (сосредоточенная $F = 0{,}1$ Н под углом 45° и распределенная $P = 4{,}0 \cdot 10^8$ Па) и тепловой поток $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 (при теплоотводе с коэффициентом $h = 10^5$ Вт/(м^2·град). Контрольные точки (КТ), выделенные по методике [25], были симметрично расположены в контактирующих подслоях слоя TiC ($ПС_1$) — КТ1–КТ20 и в подслое слоя TiN ($ПС_2$) — КТ21–КТ40. Численные эксперименты выполняли с использованием автоматизированной системы термопрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [5].

Тепловое состояние $ПС_1$ и $ПС_2$ TiC/TiN-покрытия имеет следующие статистические характеристики T: наибольшее $T_{макс}$, наименьшее $T_{мин}$ и среднее $T_{ср}$ значение. Структурную неоднородность напряжений в $ПС_1$ и $ПС_2$ характеризовали следующими статистическими параметрами: σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i: наибольшее $\sigma_{макс}$, наименьшее $\sigma_{мин}$ и среднее $\sigma_{ср}$ значение, диапазон Σ изменения, стандартное отклонение s и число N изменения знака. Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия оценивали следующими характеристиками: $\Sigma^{гр}$, $\sigma^{гр}_{макс}$, $\sigma^{гр}_{мин}$, $\sigma^{гр}_{ср}$ и $s^{гр}$, рассчитанными как среднее арифметическое $\sigma_{макс}$, $\sigma_{мин}$, $\sigma_{ср}$, Σ и s значений интенсивности напряжений σ_i в $ПС_1$ и $ПС_2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов температур в $ПС_1$ и $ПС_2$ системы № 1 и 2 под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 показаны на рис. 1. Кривые, характеризующие изменение температур в $ПС_1$ и $ПС_2$ разных систем, имеют одинаковый вид и характеризуются тремя участками. На первом участке (КТ1–КТ8 $ПС_1$ и КТ21–КТ28 $ПС_2$) температура резко увеличивается, на втором участке (КТ8–КТ15 $ПС_1$ и КТ28–КТ35 $ПС_2$) — практически не изменяется и на третьем участке (КТ15–КТ20 $ПС_1$ и КТ35–КТ40 $ПС_2$) — резко уменьшается. Наименьшие температуры зафиксированы в КТ, примыкающим к участкам, с которых осуществляется отвод тепла.

Под действием приложенного теплового потока в $ПС_1$ системы № 1 температура на участке КТ1–КТ8 увеличивается со 129 до 880 °С, а на участке КТ15–КТ20 — уменьшается до 249 °С (см. рис. 1, *а*). В $ПС_2$ этой системы на участке КТ21–КТ28 температура увеличивается с 258 до 897 °С, а на участке КТ35–КТ40 — уменьшается до 477 °С (см. рис. 1, *б*). В $ПС_1$ $T_{мин}$ меньше, чем в $ПС_2$, в два раза, а $T_{макс}$ и $T_{ср}$ на 2 и 7 % соответственно. Температура в $ПС_1$ системы № 2 на участке КТ1–КТ8 увеличивается со 118 до 749 °С, а на участке КТ15–КТ20 — уменьшается до 214 °С (см. рис. 1, *в*). Температура в $ПС_2$ на участке КТ21–КТ28 увеличивается с 236 до 770 °С, а на участке КТ35–КТ40 — уменьшается до 409 °С (см. рис. 1, *г*). В $ПС_1$ $T_{мин}$ меньше, чем в $ПС_2$, в два раза, а $T_{макс}$ и $T_{ср}$ на 6 и 7 % соответственно.

Результаты расчетов напряжений в $ПС_1$ и $ПС_2$ систем № 1 и 2 под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 показаны на рис. 2.

Установлено, что σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i в $ПС_1$ систем № 1 и 2 на участках КТ4–КТ17 и КТ24–КТ40 изменяются достаточно стабильно, а на участках с резким изменением температуры зафиксированы существенные «скачки» напряжений. Кривые σ_{11}, σ_{22} и σ_{12} для $ПС_2$ систем № 1 и 2 имеют более сглаженный вид, по сравнению с $ПС_1$, причем на кривых σ_i выделяются три характерных участка. На первом участке (КТ21–КТ26) σ_i уменьшается, на втором участке (КТ26–КТ35) σ_i практически не изменяется, на третьем участке (КТ35–КТ40) σ_i увеличивается и достигает наибольшего значения в КТ40.

Установлено, что в $ПС_1$ системы № 1 под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 675 МПа — от 38 (КТ5) до –637 МПа (КТ19) при $\sigma_{ср} = -179$ МПа, стандартном отклоне-

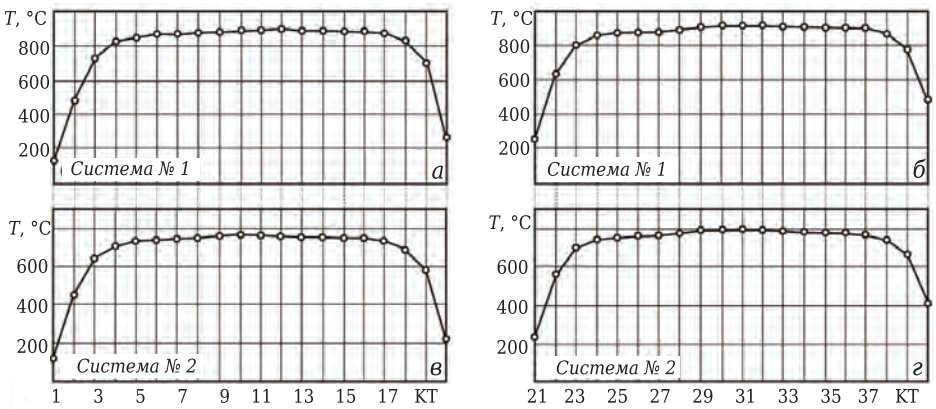

Рис. 1. Температура в ПС1 (*а*, *в*) и ПС2 (*б*, *г*) разных систем под действием теплового потока

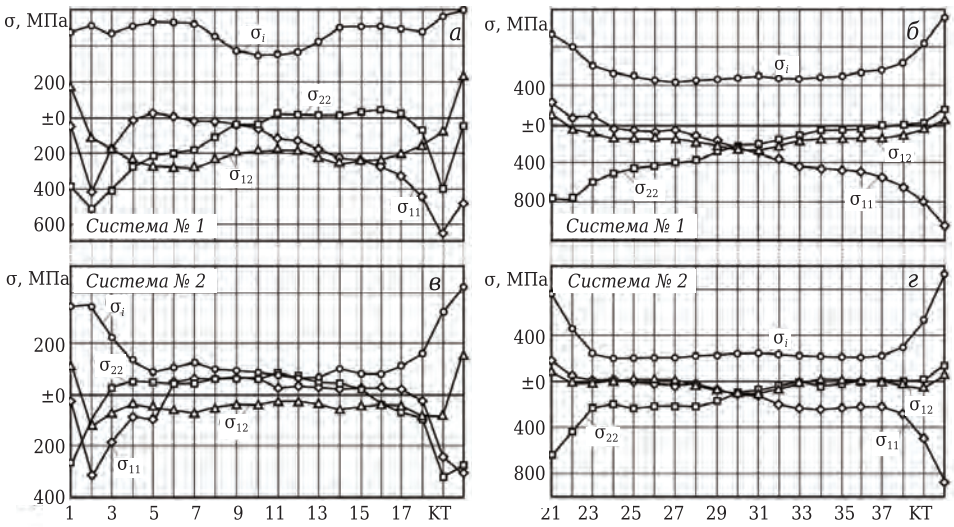

Рис. 2. Напряжения в ПС1 (*а*, *в*) и ПС2 (*б*, *г*) разных систем под действием теплового потока

нии s = 190 МПа и числе изменений знака N = = 2 (см. рис. 2, *а*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 558 МПа — от 51 (КТ16) до –507 МПа (КТ2) при $\sigma_{ср}$ = –128 МПа, s = 176 МПа и N = = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 521 МПа — от 232 (КТ20) до –289 МПа (КТ7) при $\sigma_{ср}$ = –172 МПа, s = 139 МПа и N = 2. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 257 МПа от 343 (КТ10) до 600 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = = 474 МПа и s = 73 МПа.

В $ПС_2$ системы № 1 под действием теплового потока формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 1243 МПа — от 233 (КТ21) до –1010 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = –279 МПа, s = 313 МПа и N = 1 (см. рис. 2, *б*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 938 МПа — от 179 (КТ40) до –759 МПа (КТ22) при $\sigma_{ср}$ = –249 МПа, s = 264 МПа и N = 1. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 350 МПа — от 105 (КТ21) до –245 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср}$ = –121 МПа, s = 87 МПа и N = 2. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 684 МПа — от 430 (КТ27) до 1114 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = 579 МПа и s = 185 МПа.

В $ПС_1$ системы № 2 под действием теплового потока формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 386 МПа — от 71 (КТ9) до –315 МПа (КТ2) при $\sigma_{ср}$ = –35 МПа, стандартном отклонении s = 125 МПа и числе изменений знака N = 2 (см. рис. 2, *в*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 404 МПа — от 83 (КТ11) до –321 МПа (КТ19) при $\sigma_{ср}$ = –23 МПа, s = 126 МПа и N = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 301 МПа — от –120 (КТ2) до 181 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = –31 МПа, s = 68 МПа и N = 2. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 358 МПа от 69 (КТ12) до 427 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = 160 МПа и s = 111 МПа.

В $ПС_2$ системы № 2 под действием теплового потока формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 1033 МПа — от 183 (КТ21) до –850 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = –153 МПа, s = 221 МПа и N = 1 (см. рис. 2, *г*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 782 МПа — от 144 (КТ40) до –638 МПа (КТ22) при $\sigma_{ср}$ = –133 МПа, s = 175 МПа и N = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 182 МПа — от 54 (КТ21) до –128 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср}$ = –40 МПа, s = 48 МПа и N = 2. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 731 МПа — от 200 (КТ24) до 931 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = 316 МПа и s = = 199 МПа.

Сравнительный анализ показателей структурной неоднородности напряжений в $ПС_1$ и $ПС_2$ обеих систем, сформированных тепловым потоком $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 показал следующее. Значения Σ, $\sigma_{макс}$, $\sigma_{мин}$, $\sigma_{ср}$ и s для σ_{11}, σ_{22} и σ_i в $ПС_1$ меньше, чем в $ПС_2$. Например, значения Σ, $\sigma_{макс}$, $\sigma_{мин}$, $\sigma_{ср}$ и s для σ_i в $ПС_1$ системы № 1 меньше, чем в $ПС_2$, в 2,7; 1,9; 1,3; 1,2 и 2,5 раза соответственно. Для системы № 2 эта разница составляет 2; 2,2; 2,9; 2 и 1,8 раза соответственно.

Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 определяется следующими характеристиками: $\Sigma^{гр}$ = 470,5 и 544,5 МПа; $\sigma^{гр}_{макс}$ = 857 и 679 МПа; $\sigma^{гр}_{мин}$ = 386,5 и 134,5 МПа; $\sigma^{гр}_{ср}$ = 526,5 и 238 МПа и $s^{гр}$ = 129 и 155 МПа для систем № 1 и 2 соответственно. Значения $\Sigma^{гр}$ и $s^{гр}$ для системы № 1 ниже, чем для системы № 2, на 15 и 20 % соответственно. Значения $\sigma^{гр}_{макс}$, $\sigma^{гр}_{мин}$ и $\sigma^{гр}_{ср}$ для системы № 1 выше, чем для системы № 2, в 1,3; 2,9 и 2,2 раза соответственно.

Результаты расчетов напряжений в $ПС_1$ и $ПС_2$ двух систем под действием комбинированной нагрузки (F = 0,1 Н, $P = 4{,}0 \cdot 10^8$ Па и $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2) представлены на рис. 3. Видно, что в этом случае материал зерна не оказывает существенного влияния на характер кривых σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i для $ПС_1$ и $ПС_2$ — кривые имеют однотипный вид. Особенностью этих кривых является наиболее значимое изменение напряжений на участке КТ18–КТ20.

Установлено, что в $ПС_1$ системы № 1 (см. рис. 3, *а*) формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 1117 МПа от –4 (КТ9) до –1121 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = –251 МПа, s = 303 МПа и N = 0. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 1121 МПа — от 96 (КТ11) до –1025 МПа (КТ2)

при $\sigma_{ср}$ = –319 МПа, s = 335 МПа и N = = 3. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 713 МПа — от 95 (КТ2) до 808 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = = 209 МПа, s = 154 МПа и N = 0. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 1407 МПа — от 337 (КТ14) до 1741 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = 632 МПа и s = 309 МПа.

В $ПС_2$ системы № 1 (см. рис. 3, *б*) формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 1712 МПа — от 247 (КТ21) до –1465 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = = –327 МПа, s = 403 МПа и N = 1. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 1341 МПа — от 180 (КТ40) до –1024 МПа (КТ21) при $\sigma_{ср}$ = = –466 МПа, s = 405 МПа и N = 1. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 257 МПа — от 174 (КТ32) до 431 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = 266 МПа, s = 57 МПа и N = 0. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 1266 МПа — от 466 (КТ32) до 1732 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = 865 МПа и s = 305 МПа.

В $ПС_1$ системы № 2 формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 852 МПа — от 99 (КТ10) до –753 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = –84 МПа, s = 214 МПа и N = 3 (см. рис. 3, *в*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 651 МПа — от 143 (КТ11) до –508 МПа (КТ1) при $\sigma_{ср}$ = –185 МПа, s = 178 МПа и N = 2. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 631 МПа — от 71 (КТ2) до 702 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = 359 МПа, s = 127 МПа и N = 0. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 932 МПа — от 462 (КТ18) до 1394 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср}$ = 695 МПа и s = 199 МПа.

В $ПС_2$ системы № 2 формируются напряжения σ_{11}, изменяющиеся в диапазоне 1363 МПа — от 195 (КТ21) до –1168 МПа (КТ40) при $\sigma_{ср}$ = = –178 МПа, s = 298 МПа и N = 3 (см. рис. 3, *г*). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 967 МПа — от 144 (КТ40) до –823 МПа (КТ21) при $\sigma_{ср}$ = –334 МПа, s = 286 МПа и N = 1. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 268 МПа — от 184 (КТ21) до 452 МПа (КТ28) при $\sigma_{ср}$ = 357 МПа, s = 65 МПа и N = 0. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 431 МПа — от 558 (КТ33) до 989 МПа (КТ21) при $\sigma_{ср}$ = 773 МПа и s = 128 МПа.

Сравнительный анализ показателей структурной неоднородности напряжений в $ПС_1$ и $ПС_2$ обеих систем, сформированных комбинированной нагрузкой, показал, что Σ, $\sigma_{макс}$, $\sigma_{мин}$, $\sigma_{ср}$ и s напряжений σ_{11} и σ_{22} в $ПС_1$ двух систем меньше, чем в $ПС_2$, а напряжений σ_{12} и σ_i (кроме $\sigma_{мин}$ и $\sigma_{ср}$) в $ПС_1$ больше, чем в $ПС_2$.

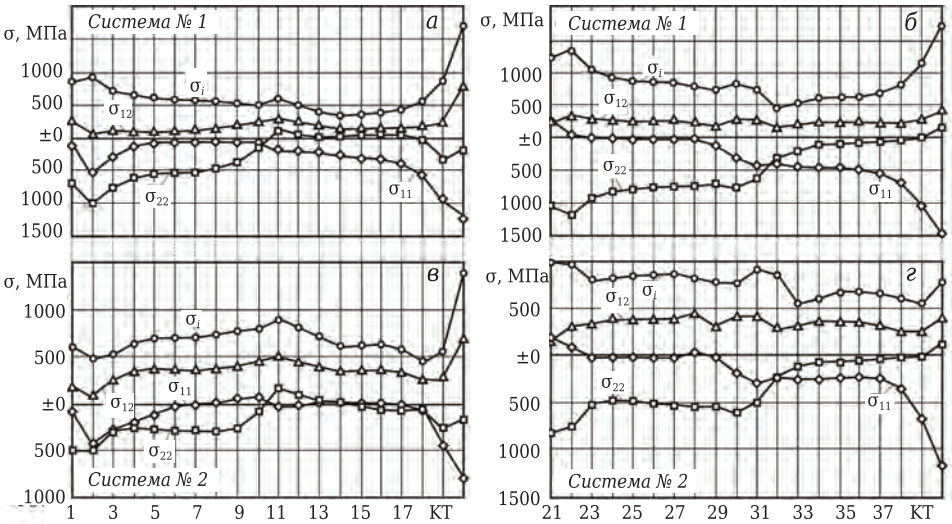

Рис. 3. Напряжения в ПС1 (*а*) и ПС2 (*б*) разных систем под действием комбинированной нагрузки

Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием комбинированной нагрузки определяется следующими характеристиками: $\Sigma^{гр}$ = 1336,5 и 681,5 МПа, $\sigma^{гр}_{макс}$ = 1736,5 и 1191,5 МПа, $\sigma^{гр}_{мин}$ = 401,5 и 510 МПа, $\sigma^{гр}_{ср}$ = 748,5 и 734 МПа и $s^{гр}$ = 307 и 164 МПа для керамики систем № 1 и 2 соответственно. Установлено, что значения $\Sigma^{гр}$, $\sigma^{гр}_{макс}$ и $s^{гр}$ для σ_i, характеризующие напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, в 2; 1,5 и 1,9 раза (соответственно) в системе № 2 меньше, чем в системе № 1. Значения $\sigma^{гр}_{мин}$ в системе № 2 больше в 1,3 раза, чем в системе № 1, а значения $\sigma^{гр}_{ср}$ в обеих системах практически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных расчетов выявлены основные закономерности термомеханических процессов на границе между слоями TiC/TiN-покрытия на нитридной керамике при совместном воздействии тепловых и силовых нагрузок. Установлено, что тепловое состояние границы между слоями двухслойного покрытия в системе с зерном из карбида титана, формируемое под действием теплового потока, характеризуется меньшими температурами, чем в системе с зерном из нитрида кремния. Значения $\sigma^{гр}_{макс}$, $\sigma^{гр}_{мин}$ и $\sigma^{гр}_{ср}$, определяющие напряженное состояние границы между слоями двухслойного покрытия TiC–TiN, при действии теплового потока меньше в 1,3; 2,9 и 2,2 раза соответственно по сравнению с системой с зерном из нитрида кремния при несколько больших значениях $\Sigma^{гр}$ и $s^{гр}$.

Под действием комбинированной нагрузки в системе с зерном из карбида титана значения

характеристик $\Sigma^{гр}$, $\sigma^{гр}_{макс}$ и $s^{гр}$, определяющих напряженное состояние границы между слоями двухслойного покрытия, меньше аналогичных характеристик системы с зерном из нитрида кремния в 2; 1,5 и 1,9 раза при практически равных значениях $\sigma^{гр}_{ср}$. Это свидетельствует о более благоприятном напряженном состоянии границы между слоями двухслойного покрытия TiC/TiN в системе с зерном из карбида титана и, соответственно, меньшей вероятности появления дефектов на границе между слоями двухслойного покрытия TiC/TiN под действием этих нагрузок по сравнению с системой с зерном из нитрида кремния с таким же двухслойным покрытием.

* * *

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

Библиографический список

1. ***Григорьев, С. Н.*** Инженерия поверхности металлорежущего инструмента методом комбинированной вакуумно-плазменной обработки (Часть 1) / *С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2004. — № 7. — С. 2–6.

2. ***Григорьев, С. Н.*** Инженерия поверхности металлорежущего инструмента методом комбинированной вакуумно-плазменной обработки (Часть 2) / *С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2004. — № 8. — С. 2–6.

3. ***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* // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

4. ***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* // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 10. — P. 994–1000.

5. ***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* // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

6. ***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* // Russ. Eng. Res. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.

7. ***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.

8. ***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.

9. ***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. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

10. ***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. — Springer, 2013. — С. 181–184.

11. ***Кузин, В. В.*** Влияние теплового потока на неоднородность напряжений в поверхности оксидной керамики с развитым рельефом / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Р. Портной* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 6. — С. 66–68.

Kuzin, V. V. The Influence of heat flow on the nonuniformity of the stresses in the surface of oxide ceramic with fully developed relief / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. R. Portnoi* // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 3. — P. 314–317.

12. ***Кузин, В. В.*** Неоднородность напряжений в поверхности оксидно-карбидной керамики с развитым рельефом под действием теплового потока / *В. В. Кузин, М. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 63–66.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in oxide-carbide ceramic surface with developed relief under action of heat flow / *V. V. Kuzin, M. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 557–560.

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

14. ***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.

15. ***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.

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. ***Kuzin, V.*** Applications of multi-level method of stress-strain state analysis in ceramic tools design / *V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Fedorov* // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 173–176.

18. ***Volosova, M.*** Cutting ceramic inserts: the influence of abrasive machining and surface coatings on the operational characteristics / *M. Volosova, S. Grigoriev* // Mechanics and Industry. — 2016. — Vol. 17 (7). — C. 705.

19. ***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.

20. ***Vereschaka, A. S.*** Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nanoscale multilayered coatings / *A. S. Vereschaka, S. N. Grigoriev, E. S. Sotova, A. A. Vereschaka* // Advanced Materials Research. — 2013. — Vols. 712–715. — P. 391–394.

21. ***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* // Refract. Ind. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.

22. ***Huang, L. L.*** Overview on double ceramic layer thermal barrier coatings / *L. L. Huang, H. M. Meng, J. Tang* [et al.] // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1053. — P. 364–372.

23. ***Верещака, А. С.*** Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью термоиндикаторных веществ / *А. С. Верещака, В. М. Провоторов, В. В. Кузин* [и др.] // Вестник машиностроения. — 1986. — № 1. — С. 45–49.

24. ***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.

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. Grigoriev* // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 12.07.2017
© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, Предраг Дашич, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

15-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС

26–29 сентября 2017 г. г. Сантьяго, Чили

И ОБЪЕДИНЕННАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОГНЕУПОРАМ

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ

- Испытания огнеупоров
- Новые установки и оборудование
- Монолитные огнеупоры
- Огнеупоры для сталелитейной промышленности
- Сырьевые материалы и глобальные вопросы
- Огнеупоры для стекольной промышленности
- Огнеупоры для цементной промышленности
- Моделирование огнеупоров
- Нефтехимия
- Огнеупоры для энергетики и переработки отходов
- Экономия энергии за счет применения огнеупоров
- Бескислородные огнеупорные системы
- Огнеупоры для химических процессов
- Разработки основных огнеупоров
- Образование в области огнеупоров
- Огнеупоры для цветной металлургии
- Безопасность, окружающая среда, переработка огнеупоров

http://www.expoclub.ru/db/exhibition/view/7983/
http://unitecr2017.org