К. т. н. **М. А. Волосова,** д. т. н. **С. Н. Григорьев**, д. т. н. **В. В. Кузин** (✉)

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА НА СТРУКТУРНУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКЕ. Часть 4. Действует тепловой поток*

Изучено влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике под действием теплового потока. Выявлено значительное влияние покрытия на характеристики, определяющие структурную неоднородность напряжений керамики. Отмечена необходимость учета структурной неоднородности напряжений при проектировании изделий из оксидно-карбидной керамики с покрытием.

Ключевые слова: *керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, тепловой поток, тепловое состояние, структурный элемент.*

ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования — анализ влияния покрытия из нитрида титана на напряженно-деформированное состояние структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием теплового потока. Решение этой научной задачи дополнит закономерности влияния силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние керамических материалов, приведенных в работах [1–4] и имеющих важное инженерное приложение [5, 6].

Методика выявления и анализа структурной неоднородности напряжений σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в поверхностном слое структурных элементов керамики под действием внешней нагрузки приведена в работе [7]. Более подробно положения этой методики изложены в публикациях [8–11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием теплового потока Q (теплоотвод в окружающую среду осуществляется с коэффициентом $h = 10^5$ Вт/(м^2·град) с поверхностей пластины, свободных от теплового потока) в керамике двух систем формируются температурные поля, имеющие одинаковую форму изотерм. Однако изотермами керамики системы ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 фиксируются значительно более высокие температуры. Например, температурное поле поверхности зерна системы ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 описывают изотермы со средними значениями температуры 970, 1393 и 1917 °С под действием теплового потока 2,0, 2,5 и $3{,}0\cdot10^7$ Вт/м^2 соответственно. Температурное поле поверхности зерна системы ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 описывают изотермы со средними значениями температуры 629, 815 и 1005 °С под действием теплового потока 2,0, 2,5 и $3{,}0\cdot10^7$ Вт/м^2 соответственно. Температура поверхностей других структурных элементов керамики этих систем на несколько градусов меньше.

Различия в тепловом состоянии поверхностей структурных элементов керамики систем ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 и ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 связаны с их разным удалением от поверхности, к которой приложен тепловой поток. Например, зерно эллипсной формы размером $a \times b = 2 \times 3$ мкм отделено от этой поверхности в первой системе только слоем металла толщиной $\Delta_м = 2$ мкм, во второй системе к слою металла ($\Delta_м = 2$ мкм) добавляется слой покрытия толщиной $\Delta_п = 5$ мкм [7].

Однако столь существенная разница в температурах не изменяет схему деформирования пластины из оксидно-карбидной керамики с покрытием системы ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 по сравнению с керамикой без покрытия системы ($TiC–MgO–Al_2O_3$)–СЧ32. Деформация керамики этих систем происходит по схеме, показанной на рис. 1. Видно, что увеличенное в размере зерно выдавливается из каркаса, перемещаясь из исходного положения 3 в положение 3^1. Для наглядности на рис. 1 стрелкой показана траектория переме-

* Части 1–3 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 8, 10 и 12 за 2014 г.

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

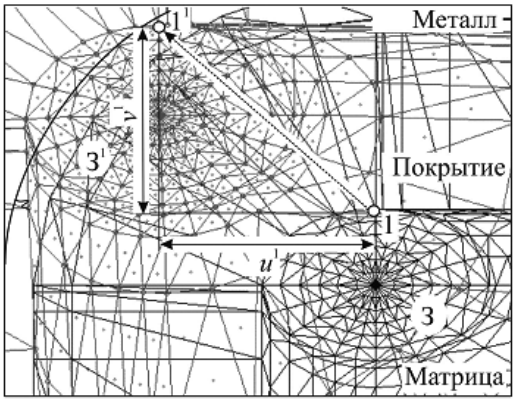

Рис. 1. Схема деформации керамики системы (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2

щения КТ1 из исходного положения 1 в деформированное положение l^1, а также ее горизонтальные u_1 и вертикальные v_1 перемещения.

Характер изменения напряжений σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i в КТ поверхностей разных структурных элементов керамики систем (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 и (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 показан на рис. 2–5. Последовательно рассмотрим полученные результаты применительно к каждой поверхности и системе.

Установлено, что в КТ поверхности зерна системы (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 513,7 МПа — от –212,7 в КТ17 до 301 МПа в КТ5 при их среднем значении $\sigma_{ср} = 0{,}89$ МПа и стандартном отклонении $s = 155{,}89$ МПа. Напряжения

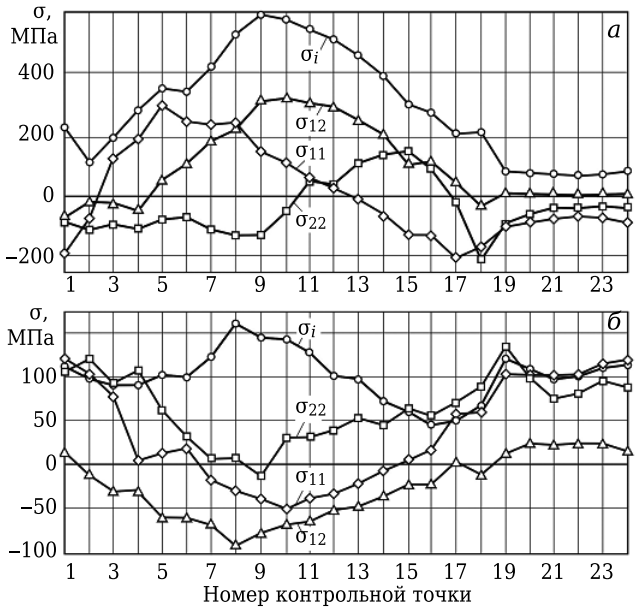

Рис. 2. Напряжения в КТ поверхности зерна керамики систем (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 (*а*) и (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 (*б*) под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2

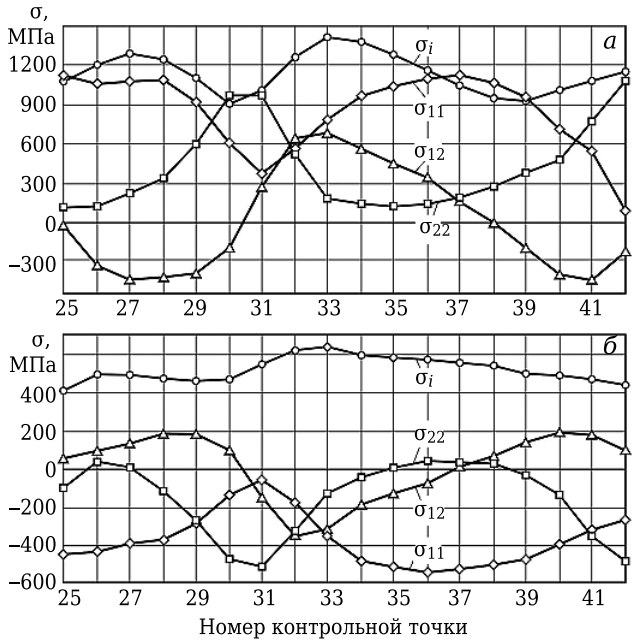

Рис. 3. Напряжения в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, керамики систем (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 (*а*) и (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 (*б*) под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2

σ_{11} дважды изменяют знак: первый раз — между КТ2 и КТ3, второй — между КТ12 и КТ13 (см. рис. 2, *а*). Напряжения σ_{22} в КТ изменяются в диапазоне 350,4 МПа — от –207,4 в КТ18 до 143 МПа в КТ15 при $\sigma_{ср} = -40{,}7$ МПа и $s = 90{,}4$ МПа. Кривая дважды пересекает нулевую линию между КТ10 и КТ11, а также между КТ16 и КТ17. Напряжения σ_{12} в КТ изменяется в диапазоне 401 МПа — от –79,7 в КТ1 до 321,3 МПа в КТ10 при $\sigma_{ср} = 94{,}03$ МПа и

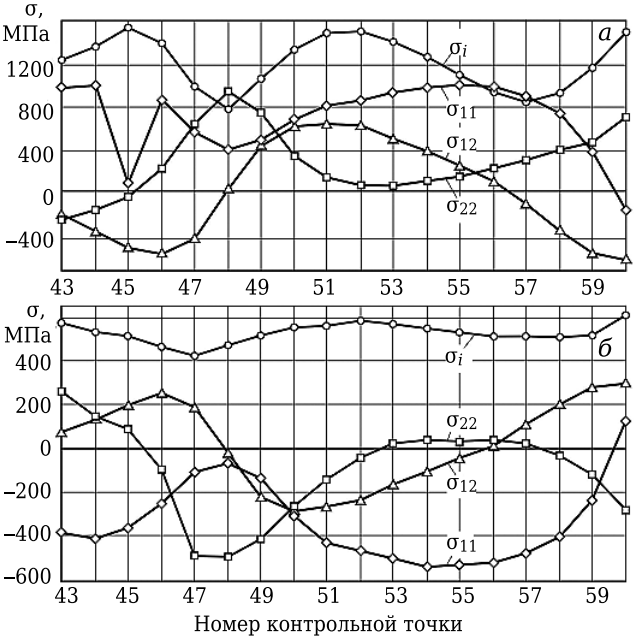

Рис. 4. Напряжения в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, керамики систем (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–СЧ32 (*а*) и (TiC–$MgO–Al_2O_3$)–TiN–СЧ32 (*б*) под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2

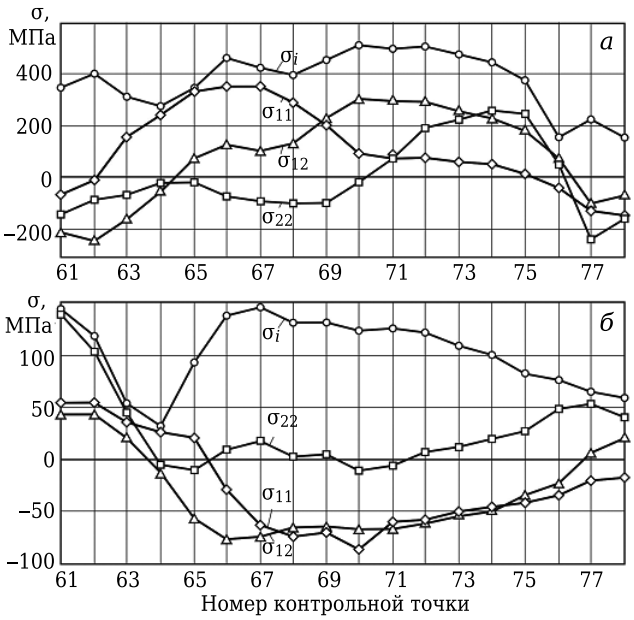

Рис. 5. Напряжения в КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе, керамики систем (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32 (*а*) и (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32 (*б*) под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2

s = 133,42 МПа. Напряжения σ_{12} 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ4 и КТ5, второй — между КТ17 и КТ18. Интенсивность напряжений σ_i в КТ изменяется в диапазоне 518,7 МПа — от 70 в КТ22 до 588,7 МПа в КТ9 при $\sigma_{ср}$ = 292,1 МПа и s = 176,2 МПа. Значения σ_i существенно изменяются в КТ поверхности зерна: на участке КТ1–КТ9 напряжения увеличиваются от 229 до 589 МПа, затем на участке КТ9–КТ19 резко уменьшаются от 589 до 70 МПа, в последующих КТ значения σ_i стабилизируются на этом уровне.

В КТ поверхности зерна керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32 под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 163 МПа — от –49 в КТ10 до 114 МПа в КТ1 при $\sigma_{ср}$ = = 34,9 МПа и s = 57,69 МПа. Эти напряжения 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ6 и КТ7, второй — между КТ14 и КТ15 (см. рис. 2, *б*). Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 134,4 МПа — от –9,3 в КТ7 до 125,1 МПа в КТ19 при $\sigma_{ср}$ = 61,94 МПа и s = 34,66 МПа. Кривая один раз пересекает нулевую линию между КТ8 и КТ9. Напряжения σ_{12} в КТ изменяются в диапазоне 115,3 МПа — от –87,1 в КТ8 до 28,2 МПа в КТ20 при $\sigma_{ср}$ = –22,16 МПа и s = 36,57 МПа. Напряжения σ_{12} в КТ поверхности зерна 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ1 и КТ2 и второй — между КТ18 и КТ19. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности зерна изменяется в диапазоне 95 МПа — от 55 в КТ16 до 150 МПа в КТ8 при $\sigma_{ср}$ = 101,54 МПа и s = 23 МПа. На первом участке этой кривой (от КТ1 до КТ8) значения σ_i увеличиваются от 100 до 150 МПа, на втором участке (от КТ8 до КТ16) значения σ_i уменьшаются от 150 до 55 МПа, на третьем участке (от КТ16 до КТ24) значения σ_i увеличиваются от 55 до 105 МПа.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32, под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 989 МПа — от 100 в КТ42 до 1089 МПа в КТ25 при $\sigma_{ср}$ = 828,7 МПа и s = 287,59 МПа. Во всех КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, напряжения σ_{11} имеют растягивающий характер (см. рис. 3, *а*). Напряжения σ_{22} в КТ изменяются в диапазоне 985 МПа — от 98 в КТ25 до 1083 МПа в КТ42 при $\sigma_{ср}$ = 415 МПа и s = 329,25 МПа. Напряжения σ_{22} во всех КТ этой поверхности также являются растягивающими. Напряжения σ_{12} в КТ изменяются в диапазоне 1155,2 МПа — от –464,1 в КТ41 до 691,1 МПа в КТ33 при $\sigma_{ср}$ = –10,6 МПа и s = 414,29 МПа. Напряжения σ_{12} 2 раза изменяют знак в КТ этой поверхности: первый раз между КТ30 и КТ31, второй — между КТ37 и КТ38. Интенсивность напряжений σ_i в КТ изменяется в диапазоне 488 МПа — от 904 в КТ30 до 1392 МПа в КТ33 при $\sigma_{ср}$ = 1115,8 МПа и s = 142,83 МПа. Значения σ_i в КТ этой поверхности имеют высокую неоднородность: например, между КТ30 и КТ33 значения σ_i увеличиваются от 904 до 1392 МПа.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32, под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 488 МПа — от –59 в КТ31 до –547 МПа в КТ36 при $\sigma_{ср}$ = –379,3 МПа и s = 145,44 МПа. Напряжения σ_{11} в КТ этой поверхности не изменяют знак и имеют сжимающий характер (см. рис. 3, *б*). Напряжения σ_{22} в КТ изменяются в диапазоне 537 МПа — от –510 в КТ31 до 27 МПа в КТ26 при $\sigma_{ср}$ = –166,17 МПа и s = 190,69 МПа. Кривая трижды пересекает нулевую линию: первый раз между КТ25 и КТ26, второй — между КТ35 и КТ36 и между КТ38 и КТ39. Напряжения σ_{12} в КТ изменяются в диапазоне 506 МПа — от –316 в КТ32 до 190 МПа в КТ40 при $\sigma_{ср}$ = 10,1 МПа и s = 168,29 МПа, а также 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ30 и КТ31, второй — между КТ37 и КТ38. Интенсивность напряжений σ_i в КТ этой поверхности межзеренной фазы изменяется в диапазоне 226 МПа — от 400 в КТ25 до 626 МПа в КТ33 при $\sigma_{ср}$ = 515,7 МПа и s = 66,14 МПа. Значения σ_i на участке КТ25–КТ33 равномерно увеличиваются от 400 до 626 МПа, затем также равномерно уменьшаются до 440 МПа в КТ42.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32, под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 1177,4 МПа — от –172 в КТ60 до 1005 МПа в КТ55 при $\sigma_{ср}$ = 690,2 МПа и s = 336,7 МПа. Напряжения σ_{11} в КТ этой поверхности один раз изменяют знак между КТ59 и КТ60

(см. рис. 4, *а*). Напряжения σ_{22} в КТ изменяются в диапазоне 1193 МПа — от –290 в КТ43 до 903 МПа в КТ48 при $\sigma_{ср}$ = 238,7 МПа и s = 322,5 МПа. Кривая пересекает нулевую линию между КТ45 и КТ46. Напряжения σ_{12} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 1286 МПа — от –643 в КТ60 до 643 МПа в КТ51 при $\sigma_{ср}$ = –11,4 МПа и s = 465,6 МПа. Напряжения 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ47 и КТ48, второй — между КТ56 и КТ57. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, изменяется в диапазоне 579 МПа — от 786 в КТ48 до 1365 МПа в КТ45 при $\sigma_{ср}$ = 1126,9 МПа и s = 193,1 МПа. Зафиксировано резкое изменение значений σ_i в КТ этой поверхности: на участке от КТ43 до КТ45 σ_i увеличивается до 1345 МПа, на участке от КТ45 до КТ48 σ_i уменьшается до 786 МПа, на участке от КТ48 до КТ51 значения σ_i увеличиваются до 1330 МПа, на участке от КТ51 до КТ57 уменьшаются до 841 МПа и на участке от КТ57 до КТ60 вновь увеличиваются до 1355 МПа.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32, под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 631 МПа — от –519 в КТ54 до 112 МПа в КТ60 при $\sigma_{ср}$ = –324,6 МПа и s = 179,43 МПа. Напряжения σ_{11} один раз изменяют знак между КТ59 и КТ60 (см. рис. 4, *б*). Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 721 МПа — от –488 в КТ47 до 233 МПа в КТ43 при $\sigma_{ср}$ = –103,3 МПа и s = 206,99 МПа. Кривая трижды пересекает нулевую линию: первый раз между КТ45 и КТ46 и еще дважды на участке КТ52–КТ58. Напряжения σ_{12} в КТ межзеренной фазы, примыкающей к матрице, изменяются в диапазоне 567 МПа — от –278 в КТ50 до 289 МПа в КТ60 при $\sigma_{ср}$ = 24,8 МПа и s = 190,46 МПа. Эти напряжения 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ47 и КТ48 и второй — между КТ55 и КТ56. Интенсивность напряжений σ_i в КТ изменяется в диапазоне 197 МПа — от 415 в КТ47 до 612 МПа в КТ60 при $\sigma_{ср}$ = 528,8 МПа и s = 50,76 МПа. Изменение σ_i в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики с покрытием, имеет значительно более стабильный характер по сравнению с керамикой без покрытия. Кривая характеризуется наличием трех максимумов — в КТ43 (σ_i = 585 МПа), КТ52 (σ_i = 594 МПа) и КТ60 (σ_i = 612 МПа), а также двух минимумов со значениями σ_i 415 (КТ47) и 555 МПа (КТ58).

В КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32, под действием теплового потока Q = $= 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 543 МПа — от –156 в КТ78 до 387 МПа в КТ66 при $\sigma_{ср}$ = 114,6 МПа и s = 173,67 МПа. Напряжения σ_{11} дважды изменяют знак: первый раз между КТ62 и КТ63, второй — между КТ75 и КТ76 (см. рис. 5, *а*). Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 350,4 МПа — от –212 в КТ77 до 250 МПа в КТ74 при $\sigma_{ср}$ = 10,4 МПа и s = 138,02 МПа. Кривая 2 раза пересекает нулевую линию: первый раз между КТ70 и КТ71, второй — между КТ76 и КТ77. Напряжения σ_{12} в КТ поверхности матрицы изменяются в диапазоне 539 МПа — от –236 в КТ62 до 303 МПа в КТ70 при $\sigma_{ср}$ = 82,6 МПа и s = = 176,7 МПа. Напряжения σ_{12} в КТ этой поверхности 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ64 и КТ65, второй — между КТ76 и КТ78. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 366 МПа — от 168 в КТ78 до 534 МПа в КТ70 при $\sigma_{ср}$ = = 394,4 МПа и s = 115,76 МПа. Кривая характеризуется двумя максимумами — в КТ66 (485 МПа) и КТ70 (534 МПа). Причем значения σ_i до первого максимума весьма нестабильны и изменяются в диапазоне 290–485 МПа, после второго максимума зафиксировано уменьшение σ_i до 168 МПа.

В КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32, под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 формируются напряжения σ_{11}, которые изменяются в диапазоне 133 МПа — от –82 в КТ70 до 51 МПа в КТ61 при $\sigma_{ср}$ = –23,6 МПа и s = 42,62 МПа. Напряжение в этой поверхности один раз изменяет знак — между КТ65 и КТ66 (см. рис. 5, *б*). Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 148 МПа — от –8 в КТ65 до 140 МПа в КТ61 при $\sigma_{ср}$ = 29,8 МПа и s = 38,63 МПа. Эти напряжения трижды пересекают нулевую линию: первый раз между КТ63 и КТ64 и дважды на участке КТ69–КТ72. Напряжения σ_{12} в КТ изменяются в диапазоне 123 МПа — от –78 в КТ66 до 45 МПа в КТ62 при $\sigma_{ср}$ = –31,1 МПа и s = 41,39 МПа. Эти напряжения 2 раза изменяют знак: первый раз между КТ63 и КТ64 и второй — между КТ76 и КТ77. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 114 МПа — от 34 в КТ64 до 148 МПа в КТ67 при $\sigma_{ср}$ = 105 МПа и s = 34,12 МПа. Изменение σ_i в поверхностном слое матрицы, примыкающей к межзеренной фазе, имеет сложный характер: между КТ61–КТ64 значения σ_i уменьшаются со 142 до 34 МПа, затем увеличиваются до 148 МПа (КТ64–КТ67) и на остальной поверхности уменьшаются до 61 МПа.

Установлено, что покрытие из нитрида титана существенно уменьшает неоднородность напряжений в поверхностном слое структурных элементов оксидно-карбидной керамики. В качестве примера на рис. 6 представлены результаты сравнительного анализа влияния покрытия на стандартное отклонение значений интенсивности напряжений σ_i, сформированных тепловым потоком $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 в КТ поверхностей разных структурных элементов керамики двух систем. Наибольшее значение стандартного отклонения s = 193,1 МПа интенсивности напряжений σ_i зафиксировано в поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к матрице в системе (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32, а наименьшее — s =

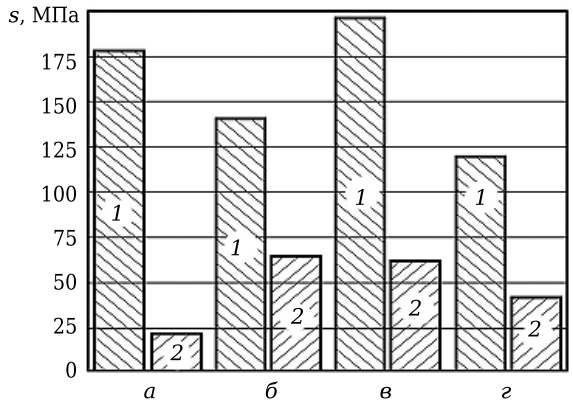

Рис. 6. Стандартное отклонение интенсивности напряжений σ_i в поверхностях зерна (*а*), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (*б*) и матрице (*в*), матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (*г*), систем (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32 (*1*) и (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32 (*2*) под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2

= 23 МПа в поверхностном слое зерна керамики в системе (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32. При этом покрытие уменьшает значения стандартного отклонения в 7,6, 2,2, 3,8 и 3,4 раза в поверхностном слое зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, а также матрицы по сравнению с этими показателями керамики без покрытия соответственно.

Установлены зависимости, определяющие влияние теплового потока на неоднородность напряжений в поверхности структурных элементов керамики разных систем. В этом исследовании использовали по одной КТ в поверхности каждого структурного элемента керамики систем (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32 и (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32, в которых зафиксированы наибольшие значения напряжений под действием теплового потока $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2. Список этих КТ приведен в таблице. Заметим, что номера КТ совпали в зерне и межзеренной фазе, примыкающей к зерну.

В качестве примера на рис. 7 представлены результаты численных экспериментов, которые свидетельствуют о сложной и неоднозначной реакции структурных элементов керамики систем (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32 и (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32 на изменение теплового потока.

Установлено, что при увеличении теплового потока с 2,0 до $2{,}5 \cdot 10^7$ Вт/м^2 значения σ_i уменьшаются в КТ поверхностных слоев всех структурных элементов керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32 (см. рис. 7, *а*). Дальнейшее увеличение мощности теплового потока до $3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 приводит к повышению σ_i. Например, в КТ8 поверхности зерна зафиксированы следующие значения интенсивности

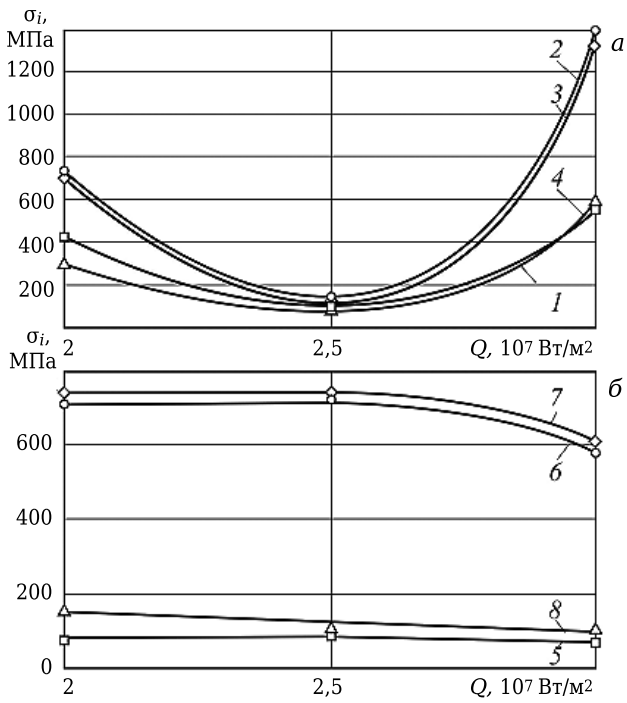

Рис. 7. Влияние Q на интенсивность напряжений σ_i в поверхностном слое зерна (*1*, *5*), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (*2*, *6*) и матрице (*3*, *7*), матрицы (*4*, *8*) керамики систем (TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32 (*а*) и (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32 (*б*)

напряжений: 282, 46 и 589 МПа при тепловых потоках 2,0, 2,5 и $3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 соответственно. Следует отметить, что наименьшие значения интенсивности напряжений σ_i формируются под действием теплового потока $2{,}5 \cdot 10^7$ Вт/м^2, его незначительное изменение способно многократно увеличить σ_i.

Структурные элементы керамики системы (TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32 иначе реагируют на изменение теплового потока: при его увеличении с 2,0 до $2{,}5 \cdot 10^7$ Вт/м^2 значения σ_i практически не изменяются в КТ8, КТ33 и КТ60, но уменьшаются в КТ67. Дальнейшее увеличение теплового потока до $3 \cdot 10^7$ Вт/м^2 приводит к уменьшению σ_i в КТ поверхностей всех структурных элементов керамики этой системы. Например, в КТ33 в поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к зерну, зафиксированы следующие значения интенсивности напряжений: 696, 716 и 626 МПа при тепловых потоках 2,0, 2,5 и $3{,}0 \cdot 10^7$ Вт/м^2 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что покрытие толщиной 5 мкм из нитрида титана TiN принципиально не изменяет схему

КТ, в которых зафиксированы наибольшие значения напряжений под действием $Q = 3{,}0 \cdot 10^7$

Керамика системы	Контрольные точки на поверхности			
	зерна	межзеренной фазы, примыкающей		матрицы
		к зерну	к матрице	
(TiC–MgO–Al_2O_3)–СЧ32	КТ8	КТ33	КТ45	КТ70
(TiC–MgO–Al_2O_3)–TiN–СЧ32	КТ8	КТ33	КТ60	КТ67

деформирования структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием теплового потока, но благоприятно влияет на напряженно-деформированное состояние их поверхностей. Позитивная роль покрытия заключается в уменьшении диапазона изменения напряжений: в КТ поверхности зерна, межзеренной фазы (примыкающей к зерну и матрице) и матрицы диапазон изменения напряжений σ_{11} уменьшается в 3,15, 2,0, 1,7 и 4,0 раза, σ_{22} — в 2,6, 1,8, 1,7 и 3,1 раза, σ_{12} — в 3,5, 2,3, 2,3 и 4,4 раза, σ_i — в 16,7, 2,2, 2,9 и 3,2 раза соответственно. Также уменьшается уровень неоднородности напряжений в поверхностном слое структурных элементов керамики. В КТ поверхности зерна, межзеренной фазы (примыкающей к зерну и матрице) и матрицы значения стандартного отклонения напряжений σ_{11} уменьшаются в 2,7, 2,0, 1,9 и 4,1 раза; σ_{22} — в 2,6, 1,7, 1,6 и 3,6 раза, σ_{12} — в 3,6; 2,5; 2,5 и 4,3 раза, σ_i — в 7,7, 2,2, 3,8 и 3,4 раза соответственно.

Такое существенное изменение напряженно-деформированного состояния основных структурных элементов позволяет предположить, что изделия из оксидно-карбидной керамики с покрытием из нитрида титана способны выдержать более высокие тепловые нагрузки при эксплуатации по сравнению с изделиями из керамики без покрытия. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании изделий из оксидно-карбидной керамики для заданных условий эксплуатации.

* * *

Работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности МГТУ «Станкин».

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. ***Григорьев, С. Н.*** Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / *С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.

Grigor'ev, S. N. Influence of thermal loads on the stress–strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / *S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin* [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 5. — P. 473–477.

2. ***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.

3. ***Кузин, В. В.*** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние теплового нагружения / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 2. Effect of thermal loading / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.

4. ***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.

5. ***Кузин, В. В.*** Тепловое состояние керамических режущих инструментов при высокоскоростной обработке резанием / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 9. — С. 47–52.

Kuzin, V. V. Thermal state of ceramic cutting tools in high-speed cutting / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 9. — P. 32–40.

6. ***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.

7. ***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.

8. ***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.

9. ***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.

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

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

11. ***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 05.06.14
© М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, 2015 г.