

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 3. Действует распределенная силовая нагрузка*

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

Ключевые слова: керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, распределенная силовая нагрузка, структурный элемент.

ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования — анализ влияния покрытия из нитрида титана на напряженно-деформированное состояние структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием сосредоточенной силы. Решение этой научной задачи дополнит закономерности влияния силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние керамических материалов, приведенных в работах [1–4].

Методика выявления и анализа структурной неоднородности напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в поверхности (поверхностном слое) структурных элементов керамики под действием внешней нагрузки приведена в работе [5]. Более подробно положения этой методики изложены в работах [6–9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пластина из оксидно-карбидной керамики без покрытия (система $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-СЧ32}$) и с покрытием из нитрида титана толщиной 5 мкм (система $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-СЧ32}$) под действием распределенной силы P деформируется по схеме, представленной на рис. 1. Зерна в керамике систем $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-СЧ32}$ (рис. 1, а) и $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-СЧ32}$ (рис. 1, б) из ис-

ходного положения 3 перемещаются во внутренний объем керамики, занимая положение 3'. В качестве примера на схемах показаны траектории перемещения КТ1 из исходного положения 1 в деформированное положение 1' и значения ее горизонтальных u^1 и вертикальных v^1 перемещений. Видно, что наибольшие перемещения КТ1 происходят в горизонтальном направлении.

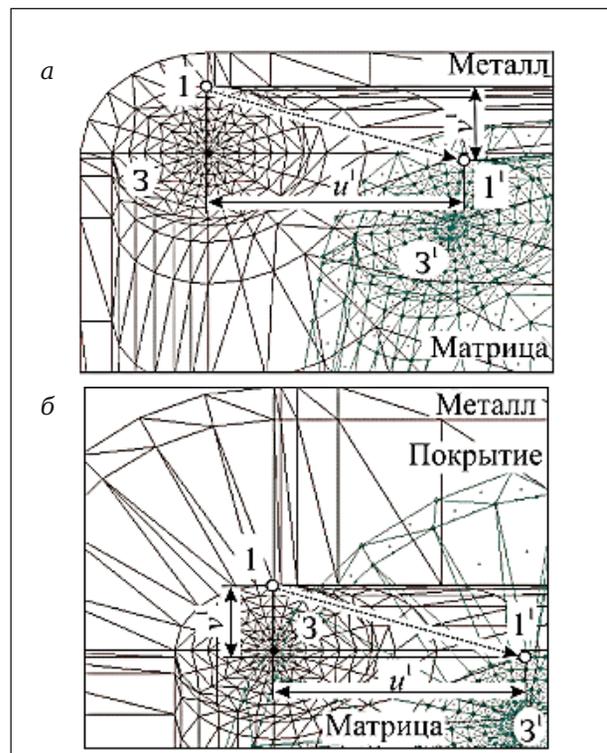


Рис. 1. Схемы деформации керамики систем $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-СЧ32}$ (а) и $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-СЧ32}$ (б) под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

* Части 1 и 2 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 8, с. 28–31 и 10, с. 77–82 за 2014 г.



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

Характер изменения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в КТ поверхностей разных структурных элементов керамики систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па показан на рис. 2–5. Последовательно рассмотрим полученные результаты применительно к каждой поверхности и системе.

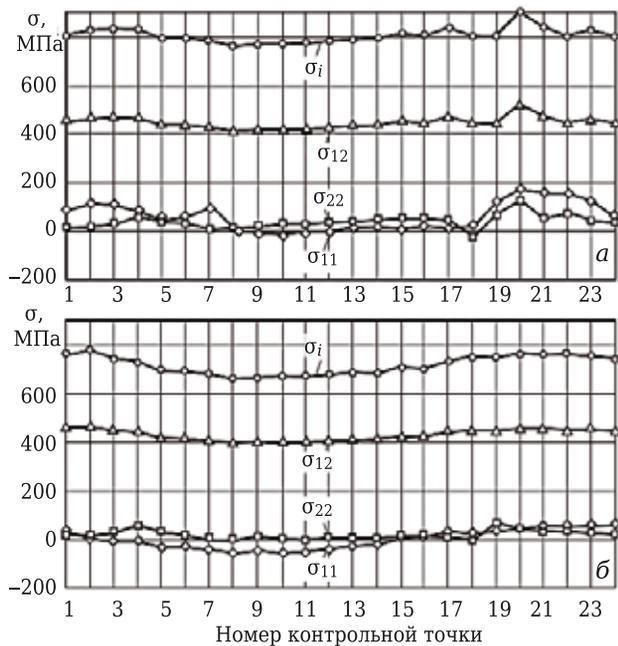


Рис. 2. Напряжения в КТ поверхности зерна керамики систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (а) и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (б) под действием распределенной нагрузки $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

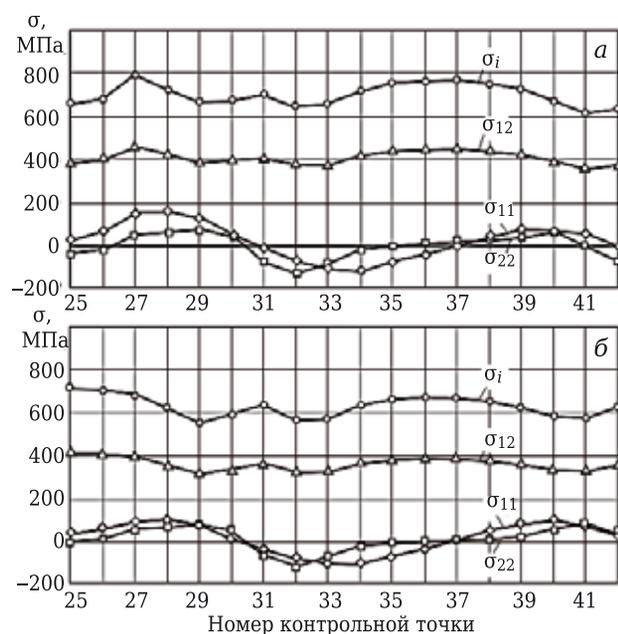


Рис. 3. Напряжения в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну керамики систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (а) и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (б) под действием распределенной нагрузки $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

В поверхностном слое зерна системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (см. рис. 2, а) формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 140,24 МПа — от -11,94 в КТ10 до 128,3 МПа в КТ20 при их среднем значении (с учетом знака) $\sigma_{cp} = 41,98$ МПа и стандартном отклонении $s = 45,8$ МПа. Эти напряжения 2 раза изменяют знак: между КТ8 и КТ9 и между КТ12 и КТ13. Напряже-

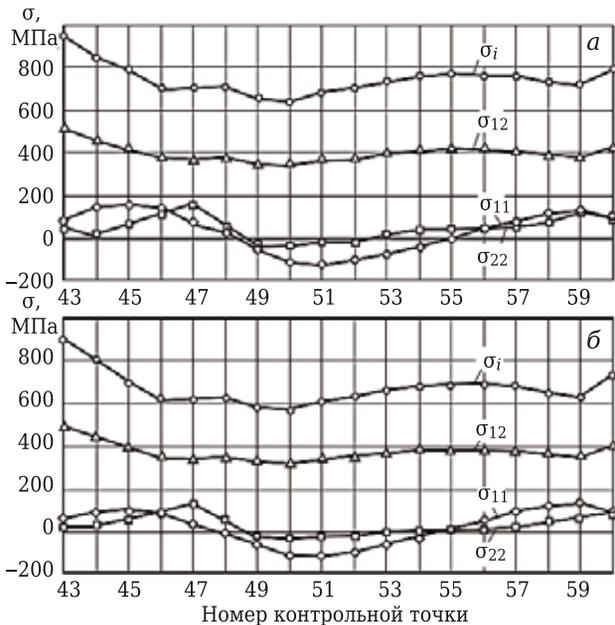


Рис. 4. Напряжения в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (а) и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (б) под действием распределенной нагрузки $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

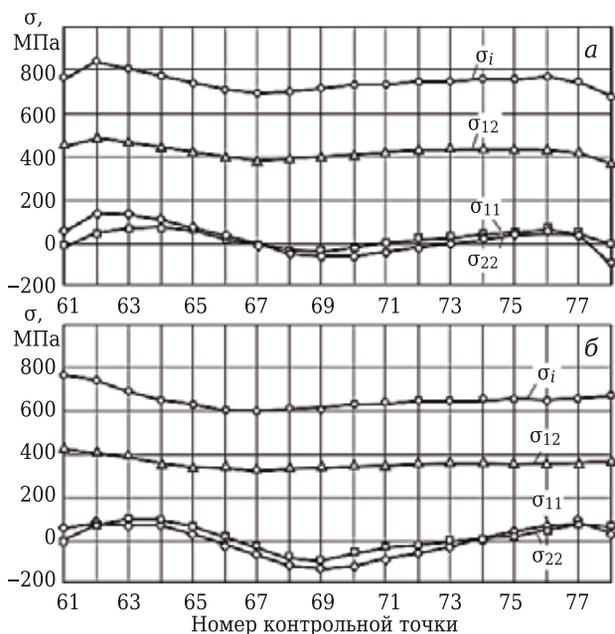


Рис. 5. Напряжения в КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе керамики систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (а) и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (б) под действием распределенной нагрузки $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

ние σ_{22} изменяются в диапазоне 142,35 МПа — от -14,65 в КТ2 до 127,7 МПа в КТ20 при $\sigma_{ср} = 42,38$ МПа и $s = 27$ МПа. Кривая дважды пересекает нулевую линию — на отрезке КТ17–КТ18. Напряжение σ_{12} изменяется в диапазоне 73,3 МПа — от 436,3 в КТ8 до 509,6 МПа в КТ20 при $\sigma_{ср} = 460,95$ МПа и $s = 16,55$ МПа, при этом напряжение во всем поверхностном слое не изменяет знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 136 МПа — от 756 в КТ8 до 892 МПа в КТ20 при $\sigma_{ср} = 798,6$ МПа и $s = 29,28$ МПа. Изменение значений интенсивности напряжений σ_i в поверхностном слое зерна имеет стабильный характер.

В поверхностном слое зерна системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (см. рис. 2, б) формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 83,7 МПа — от -48,4 в КТ10 до 35,3 МПа в КТ24 при $\sigma_{ср} = -5,82$ МПа и $s = 28,59$ МПа. Эти напряжения 2 раза изменяют знак: между КТ1 и КТ2 и между КТ15 и КТ16. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 53,7 МПа — от -5,6 в КТ7 до 48,1 МПа в КТ19 при $\sigma_{ср} = 12,14$ МПа и $s = 14,23$ МПа. Кривая 5 раз пересекает нулевую линию: первый раз между КТ6 и КТ7 и четырежды на отрезке КТ7–КТ18. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 59 МПа — от 389 в КТ8 до 448 МПа в КТ2 при $\sigma_{ср} = 419,54$ МПа и $s = 20,92$ МПа, при этом напряжение во всем поверхностном слое не изменяет знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 100 МПа — от 676 в КТ8 до 776 МПа в КТ2 при $\sigma_{ср} = 727,29$ МПа и $s = 35,74$ МПа. Изменение значений интенсивности напряжений σ_i в поверхностном слое зерна системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 также имеет стабильный характер.

В поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к зерну системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (см. рис. 3, а), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 264,8 МПа — от -99 в КТ34 до 165,8 МПа в КТ28 при $\sigma_{ср} = 30,52$ МПа и $s = 83,2$ МПа. Напряжения трижды изменяют знак: первый раз — между КТ31 и КТ32, второй — между КТ36 и КТ37, третий — между КТ41 и КТ42. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 231,6 МПа — от -118,5 в КТ32 до 113,1 МПа в КТ29 при $\sigma_{ср} = 35,03$ МПа и $s = 64,33$ МПа. Кривая трижды пересекает нулевую линию: первый раз — между КТ26 и КТ27 и еще дважды на участке КТ30–КТ34. Характер кривой практически аналогичен зависимости σ_{11} . Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 97,8 МПа — от 347,6 в КТ41 до 445,4 МПа в КТ27 при $\sigma_{ср} = 396,18$ МПа и $s = 29,57$ МПа. Эти напряжения во всей поверхности не изменяют знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 175,3 МПа — от 608,7 в КТ41 до 784 МПа в КТ27 при $\sigma_{ср} = 691,96$ МПа и $s = 51,02$ МПа. Изменение значений интенсивности напряжений σ_i в поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к зерну, имеет достаточно стабильный характер и характеризуется незначительным увеличением напряжений

на двух участках: КТ25–КТ27 (от 651 до 784 МПа) и КТ29–КТ36 (от 657 до 757 МПа).

В поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к зерну системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (см. рис. 3, б), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 204,9 МПа — от -115,6 в КТ33 до 89,3 МПа в КТ28 при $\sigma_{ср} = 4,84$ МПа и $s = 69,47$ МПа. Напряжения σ_{11} дважды изменяют знак: первый раз — между КТ30 и КТ31, второй — между КТ37 и КТ38. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 213,6 МПа — от -122,5 в КТ32 до 91,11 МПа в КТ41 при $\sigma_{ср} = 12,69$ МПа и $s = 58,38$ МПа. Кривая трижды пересекает нулевую линию: первый раз — между КТ25 и КТ26 и еще дважды на участке КТ30–КТ37. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 83,4 МПа — от 327 в КТ29 до 410,4 МПа в КТ25 при $\sigma_{ср} = 363,05$ МПа и $s = 26,19$ МПа. Напряжения σ_{12} во всем поверхностном слое не изменяют знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 134 МПа — от 572 в КТ29 до 711 МПа в КТ25 при $\sigma_{ср} = 632,83$ МПа и $s = 43,35$ МПа.

В поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к матрице системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (см. рис. 4, а), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 267,5 МПа — от -108,1 в КТ51 до 159,4 МПа в КТ45 при $\sigma_{ср} = 40,75$ МПа и $s = 87,87$ МПа. Напряжения 2 раза изменяют знак: первый раз — между КТ48 и КТ49, второй раз — между КТ54 и КТ55. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 197,6 МПа — от -36,6 в КТ50 до 161 МПа в КТ47 при $\sigma_{ср} = 50,73$ МПа и $s = 52,93$ МПа. Кривая дважды пересекает нулевую линию: первый раз — между КТ48 и КТ49, второй раз — между КТ52 и КТ53. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 174,6 МПа — от 367 в КТ50 до 541,6 МПа в КТ43 при $\sigma_{ср} = 425,49$ МПа и $s = 39,99$ МПа. Эти напряжения во всем поверхностном слое не изменяют знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 300,4 МПа — от 641 в КТ50 до 941,4 МПа в КТ43 при $\sigma_{ср} = 743,35$ МПа и $s = 69,44$ МПа.

В поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к матрице системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (см. рис. 4, б), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 237,3 МПа — от -127 в КТ51 до 110,3 МПа в КТ59 при $\sigma_{ср} = 5$ МПа и $s = 78,86$ МПа. Напряжения σ_{11} 2 раза изменяют знак: первый раз — между КТ47 и КТ48, второй раз — между КТ55 и КТ56. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 182,7 МПа — от -50,7 в КТ50 до 132 МПа в КТ47 при $\sigma_{ср} = 22,71$ МПа и $s = 50,65$ МПа. Кривая дважды пересекает нулевую линию: первый раз — между КТ48 и КТ49, второй — между КТ54 и КТ55. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 161 МПа — от 330 в КТ50 до 491 МПа в КТ43 при $\sigma_{ср} = 380,11$ МПа и $s = 38,55$ МПа. Эти напряжения во всем поверхностном слое не изменяют знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 270 МПа

— от 581 в КТ50 до 851 МПа в КТ43 при $\sigma_{cp} = 663,1$ МПа и $s = 64,74$ МПа.

В поверхностном слое матрицы, примыкающей к межзеренной фазе системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (см. рис. 5, а), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 241,3 МПа — от –88,7 в КТ78 до 152,6 МПа в КТ62 при $\sigma_{cp} = 31,87$ МПа и $s = 69,56$ МПа. Эти напряжения трижды изменяют знак: первый раз — между КТ67 и КТ68, второй раз — между КТ72 и КТ73 и третий — между КТ77 и КТ78. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 125,1 МПа — от –30,05 в КТ69 до 95,05 МПа в КТ47 при $\sigma_{cp} = 38,94$ МПа и $s = 39,49$ МПа. Кривая 3 раза пересекает нулевую линию: первый раз — между КТ61 и КТ62 и дважды на участке КТ67–КТ70. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 89,7 МПа — от 376,3 в КТ78 до 466 МПа в КТ62 при $\sigma_{cp} = 415,28$ МПа и $s = 21,2$ МПа. Эти напряжения на всей протяженности кривой не изменяют знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 160 МПа — от 658 в КТ78 до 818 МПа в КТ62 при $\sigma_{cp} = 722,84$ МПа и $s = 38,77$ МПа.

В поверхностном слое матрицы, примыкающей к межзеренной фазе системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (см. рис. 5, б), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 139 МПа — от –84 в КТ69 до 55 МПа в КТ63 при $\sigma_{cp} = -2,17$ МПа и $s = 49,29$ МПа. Напряжения 2 раза изменяют знак: первый раз — между КТ65 и КТ66, второй — между КТ73 и КТ74. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 121 МПа — от –50 в КТ69 до 71 МПа в КТ64 при $\sigma_{cp} = 16,19$ МПа и $s = 36,8$ МПа. Кривая на коротком участке дважды пересекает нулевую линию: первый раз — между КТ66 и КТ67, второй — между КТ72 и КТ73. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 88 МПа — от 345 в КТ67 до 433 МПа в КТ61 при $\sigma_{cp} = 374,83$ МПа и $s = 22,36$ МПа, при этом напряжение на всей протяженности кривой не изменяет знак. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 153 МПа — от 599 в КТ67 до 752 МПа в КТ61 при $\sigma_{cp} = 650,78$ МПа и $s = 38,84$ МПа.

Влияние покрытия из TiN на стандартное отклонение значений интенсивности напряжений в КТ в поверхностном слое структурных элементов двух систем показано на рис. 6.

Наибольшее значение стандартного отклонения ($s = 69,43$ МПа) зафиксировано в поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающей к матрице в системе (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32, а наименьшее ($s = 29,3$ МПа) — в поверхностном слое зерна этой системы. В поверхностном слое зерна керамики с покрытием отмечено увеличение стандартного отклонения интенсивности напряжений σ_i в 1,2 раза по сравнению с керамикой без покрытия. Покрытие уменьшает значение стандартного отклонения σ_i в 1,2 и 1,1 раза в поверхностных слоях межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице. Покрытие не изменяет значение стандартного отклонения σ_i в поверхностном слое матрицы.

Исследовали влияние распределенной нагрузки на напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в разных поверхностях элементов структуры систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32. Для этого конструкцию последовательно нагружали распределенной нагрузкой P , равной $1,5 \cdot 10^8$, $2,5 \cdot 10^8$ и $4,0 \cdot 10^8$ Па. Для анализа в каждой системе использовали КТ, в которых зафиксированы наибольшие значения напряжений. Список таких КТ приведен в таблице. В качестве примера на рис. 7 показаны результаты этих

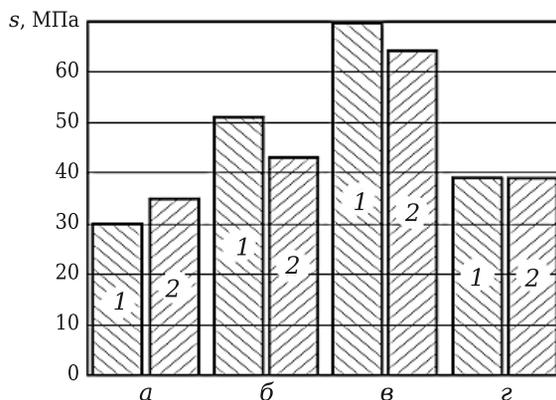


Рис. 6. Стандартное отклонение s интенсивности напряжений в поверхностном слое зерна (а), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (б) и матрице (в), матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (г), систем (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32 (1) и (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 (2) под действием распределенной нагрузки $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

Расположение КТ на поверхности	(TiC–MgO–Al ₂ O ₃)–СЧ32	(TiC–MgO–Al ₂ O ₃)–TiN–СЧ32
Зерна	КТ20	КТ2
Межзеренной фазы, примыкающей к зерну	КТ27	КТ25
Межзеренной фазы, примыкающей к матрице	КТ43	КТ43
Матрицы	КТ62	КТ61

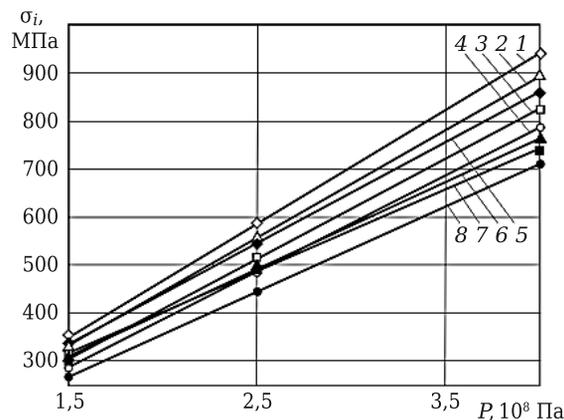


Рис. 7. Влияние распределенной силы P на интенсивность напряжений σ_i в поверхности зерна (1, 4), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (2, 5) и матрице (3, 6), матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (4, 8) разных систем: 1–4 — система (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32; 5–8 — система (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32

численных экспериментов относительно интенсивности напряжений σ_i .

Установлено, что при повышении сосредоточенной силы линейно увеличиваются значения σ_i в поверхностных слоях всех структурных элементов керамики. Наиболее заметное увеличение зафиксировано в поверхностных слоях структурных элементов системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32, а наименьшее — системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что покрытие TiN толщиной 5 мкм принципиально не изменяет схему деформирования структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием распределенной силовой нагрузки. Положительный эффект этого покрытия на напряженно-деформированное состояние поверхности структурных элементов оксидно-карбидной керамики проявляется прежде всего в уменьшении диапазона изменения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i . При этом выявлено неоднозначное влияние покрытия на напряженно-деформированное состояние поверхности структурных элементов оксидно-карбидной керамики.

Наиболее чувствителен к покрытию поверхностный слой зерна, в котором диапазон изменения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i уменьшился в 1,24–2,65 раза, причем диапазон изменения σ_i в этом слое уменьшился в 1,36 раза. В поверхностных слоях межзеренной фазы, примыкающих к зерну и к матрице, а также в поверхностном слое матрицы зафиксировано уменьшение диапазона изменения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в 1,1–1,29, 1,09–1,12 и 1,02–1,73 раза соответственно. Диапазон изменения σ_i в этих же поверхностных слоях уменьшился в 1,26, 1,11 и 1,05 раза соответственно, что свидетельствует о существенной значимо-

Библиографический список

1. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 1. — С. 67–71.

Grigor'ev, S. N. Influence of 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, № 1. — P. 61–67.

2. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 1. Влияние сложного механического нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 47–51.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 1. Effect of complex mechanical loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 416–419.

3. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней

сти масштабного фактора во влиянии покрытия TiN на напряженно-деформированное состояние поверхности структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием распределенной силовой нагрузки.

К позитивным изменениям также следует отнести уменьшение максимальных и средних напряжений в КТ поверхности всех структурных элементов керамики системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 по сравнению с показателями керамики системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32.

При этом покрытие неоднозначно влияет на неоднородность напряжений в поверхностном слое структурных элементов керамики. Зафиксировано уменьшение стандартного отклонения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице. В КТ поверхности зерна и матрицы керамики системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–TiN–СЧ32 стандартные отклонения σ_{11} и σ_{22} уменьшаются, а σ_{12} и σ_i увеличиваются по сравнению с показателями керамики системы (TiC–MgO–Al₂O₃)–СЧ32.

Покрытие практически не изменяет число смен знака напряжений в КТ поверхности структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием распределенной нагрузки, но увеличивает этот показатель с 2 до 5 в отношении напряжения σ_{22} в поверхностном слое зерна.

Изменение напряженно-деформированного состояния основных структурных элементов 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».

нагрузки. Часть 3. Влияние распределенной силовой нагрузки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 42–46.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 3. Effect of a distributed force load / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 36–39.

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. **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.

6. 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.

7. 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.

8. Григорьев, С. Н. Автоматизированная система термомпрочностных расчетов керамических режущих пла-

стин / 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.

9. 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 30.05.14

© М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, 2014 г.

Д. т. н. С. А. Ляпцев, д. т. н. В. Я. Потапов, д. т. н. С. Я. Давыдов (✉),
к. т. н. В. В. Потапов, Л. А. Семериков, Е. А. Васильев

ФБГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 622.77.091: 622.567.6

КЛАССИФИКАЦИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРЕ О РАЗДЕЛИТЕЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Приведено основное уравнение динамики, характеризующее поведение частиц при ударе о разделительную поверхность. Представлены результаты расчета угла и скорости отражения, времени и абсциссы падения после удара частиц некоторых материалов (угольных сланцев, асбеста).

Ключевые слова: методика, фрикционные характеристики, дифференциальные уравнения, графические зависимости.

В последние годы в практике разработки конструкций строительных и горных машин для разделения и классификации руд используют различия в трении и упругости минералов. Машины этого принципа действия применяют в основном для разделения неметаллических полезных ископаемых, таких как доломит, гранит, асбест, слюда, а также могут быть использованы для очищения глин от твердых включений при производстве огнеупоров и керамики [1–6].

Основной недостаток существующих машин, основанных на эффектах взаимодействия горной массы с рабочей поверхностью аппаратов, — разделение горных пород не по комплексу физико-механических свойств, а по одному наиболее контрастному признаку: трению, упругости, форме или твердости. Внедрение новых аппаратов

по одному признаку разделения лишь частично обеспечивает возможности качественного разделения горных пород.

Наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является создание конструкций, в которых при разделении учитывается комплекс физико-механических свойств горных пород, что обеспечивает более полное разделение полезных ископаемых в одном аппарате.

Физико-механические характеристики пород в литературе представлены в основном одним статическим коэффициентом трения, а сведения об упругих свойствах минералов практически отсутствуют. В разных источниках одни те же минералы имеют разные значения коэффициентов: трения, восстановления и мгновенного трения при ударе, формы и твердости. В настоящей статье рассмотрено поведение частиц при ударе о наклонную поверхность.

При ударе частицы об упругую шероховатую плоскость происходит изменение величины и направления скорости частицы из-за ударного и фрикционного воздействия. Частицы с разными



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru