

Cement and Concrete Research. — 1978. — Vol. 8, Issue 2. — P. 169–172.

15. **Palou, M.** Formation and stability of crystallohydrates in the non-equilibrium system during hydration of sab cements / *M. Palou, J. Majling, M. Dovál* [et al.] // *Ceramics – Silikáty*. — 2005. — Vol. 49, № 4. — P. 230–236.

16. **Bentsen, S.** Effect of elkem microsilica on conversion of HAC / *S. Bentsen, A. Seltveit, B. Sandberg* // Presented at the Midgley Symposium on Calcium Aluminate Cement, London, 9–11 July, 1990.

17. **Ding, J.** Stratlingite formation in high alumina cement – silica fume systems: significance of sodium ions / *J. Ding, Y. Fu, J. J. Beaudoin* // *Cement and Concrete Research*. — 1995. — Vol. 25, № 6. — P. 1311–1319.

18. **Ding, J.** Study of hydration mechanisms in the high alumina cement - sodium silicate system / *J. Ding, Y. Fu, J. J. Beaudoin* // *Cement and Concrete Research*. — 1996. — Vol. 26, № 5. — P. 799–804.

19. **Monosi, S.** Materials and structures/matériaux et constructions / *S. Monosi, R. Troli, L. Coppola* [et al.] // *Materials and Structures*. — 1996. — Vol. 29. — P. 639–644.

20. **Ding, J.** Effect of different inorganic salts / alkali on conversion-prevention in high alumina cement products / *J. Ding, Y. Fu, J. J. Beaudoin* // *Advanced Cement Based Materials*. — 1996. — № 4. — P. 43–47.

21. **Edmonds, R. N.** The hidratation of mixtures of monoclium aluminat and blastfurnace slag / *R. N. Edmonds, A. J. Majumdar* // *Cement and Concrete Research*. — 1989. — Vol. 19, Issue 5. — P. 779–782.

22. **García Calvo, J. L.** Development of low-pH cementitious materials based on CAC for HLW repositories: Long-term hydration and resistance against groundwater aggression / *J. L. García Calvo, M. C. Alonso, A. Hidalgo* [et al.] // *Cement and Concrete Research*. — 2013. — Vol. 51. — P. 67–77.

23. **Гоберис, С.** Исследование влияния триполифосфата натрия на свойства среднецементного жаростойкого бетона на цементе Gorkal-40 / *С. Гоберис, И. Пундиене, В. Антонович* // *Новые огнеупоры*. — 2005. — № 11. — P. 32–37.

Goberis, S. The effect of sodium tripolyphosphate on the properties of medium-cement refractory castables based on Gorkal-40 cement / *S. Goberis, I. Pundiene, V. Antonovich* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2005. — Vol. 46, № 6. — P. 403–408.

24. **Wutz, K.** Degussa Construction Polymers GmbH, http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=5781&cat_id=&page_id=2).■

Получено 28.04.14

© И. Демидова-Буйзинене,
И. Пундиене, 2014 г.

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 2. Действует сосредоточенная сила*

Изучено влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике под действием сосредоточенной силовой нагрузки. Выявлено значительное 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, сосредоточенная сила, 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, изучение которых проводили 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

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 8 за 2014 г., с. 28–31.



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

работе [5]. Более подробно положения этой методики изложены в работах [6–9]. Анализ влияния других схем внешнего нагружения будет приведен в следующих статьях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пластина из оксидно-карбидной керамики без покрытия (система $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-C}\chi\text{32}$) и пластина с покрытием из нитрида титана толщиной 5 мкм (система $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-C}\chi\text{32}$) под действием сосредоточенной силы F , действующей под углом β , деформируются по схеме, показанной на рис. 1. Зерно из исходного положения 3 опускается вниз и выдавливается из каркаса, занимая положение 3'. Для наглядности на рис. 1 стрелкой показана траектория перемещения КТ1 из исходного положения l в деформированное положение l' , а также значения ее горизонтальных u^1 и вертикальных v^1 перемещений. Видно, что наибольшие перемещения КТ1 происходят в вертикальном направлении.

Характер изменения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в КТ поверхностей разных структурных элементов керамики систем $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-C}\chi\text{32}$ и $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-C}\chi\text{32}$ под действием сосредоточенной силы $F = 0,01 \text{ Н}$ ($\beta = 45^\circ$) представлен на рис. 2–5. Последовательно рассмотрим полученные результаты применительно к каждой поверхности и системе.

В КТ поверхности зерна системы $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-C}\chi\text{32}$ формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 79,2 МПа — от 64,9 в КТ24 до –14,3 МПа в КТ20 при их среднем значении (с учетом знака) $\sigma_{\text{ср}} = 13,5 \text{ МПа}$ и стандартном отклонении $s = 27,5 \text{ МПа}$ (см. рис. 2, а). Эти напряжения 4 раза изменяют знак: первый раз — между КТ8 и КТ9 и 3 раза между КТ16 и КТ21. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 298,5 МПа — от 39,5 в КТ2

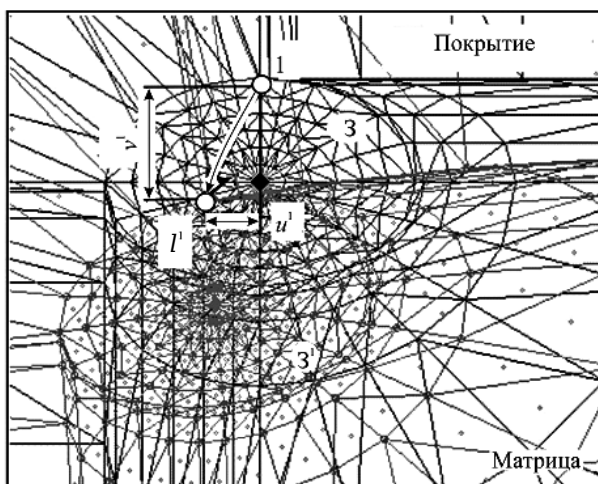


Рис. 1. Примеры схемы деформации системы $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-C}\chi\text{32}$ под действием сосредоточенной силы $F = 0,01 \text{ Н}$ ($\beta = 45^\circ$)

до –259 МПа в КТ20 при $\sigma_{\text{ср}} = -37,5 \text{ МПа}$ и $s = 70,3 \text{ МПа}$. Кривая 4 раза пересекает нулевую линию: между КТ7 и КТ8, КТ8 и КТ9, КТ9 и КТ10, КТ22 и КТ23. Напряжения σ_{12} в КТ поверхности зерна изменяются в диапазоне 172,4 МПа — от 120,5 в КТ22 до –51,9 МПа в КТ20 при $\sigma_{\text{ср}} = 11,6 \text{ МПа}$ и $s = 31,7 \text{ МПа}$. Зафиксировано четырехкратное изменение знака этих напряжений: между КТ1 и КТ2, КТ8 и КТ9, КТ17 и КТ18, КТ20 и КТ21. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности

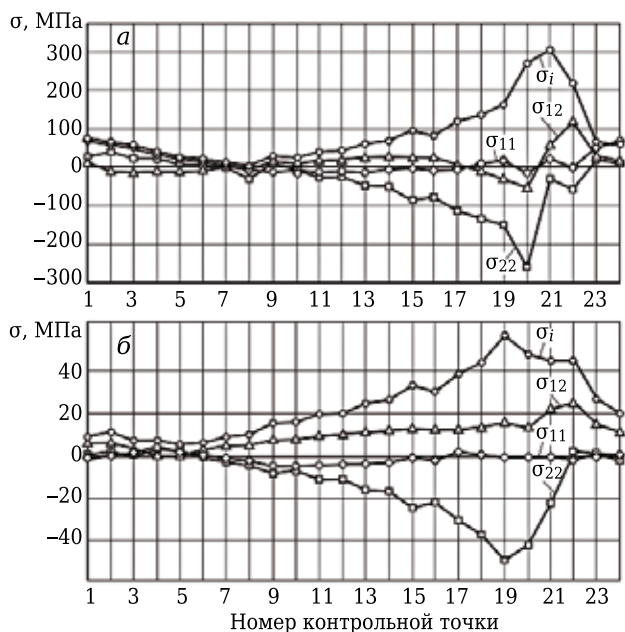


Рис. 2. Напряжения в КТ поверхности зерна керамики систем $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-C}\chi\text{32}$ (а) и $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-C}\chi\text{32}$ (б) под действием $F = 0,01 \text{ Н}$ ($\beta = 45^\circ$)

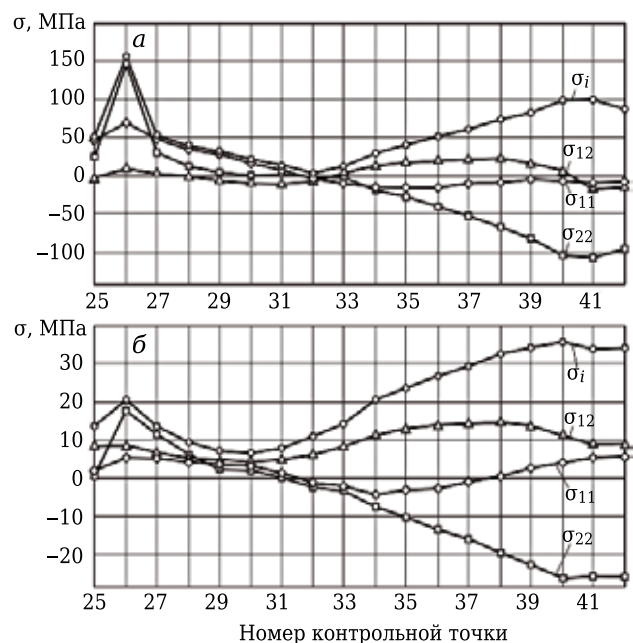


Рис. 3. Напряжения в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну керамики систем $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-C}\chi\text{32}$ (а) и $(\text{TiC-MgO-Al}_2\text{O}_3)\text{-TiN-C}\chi\text{32}$ (б), под действием $F = 0,01 \text{ Н}$ ($\beta = 45^\circ$)

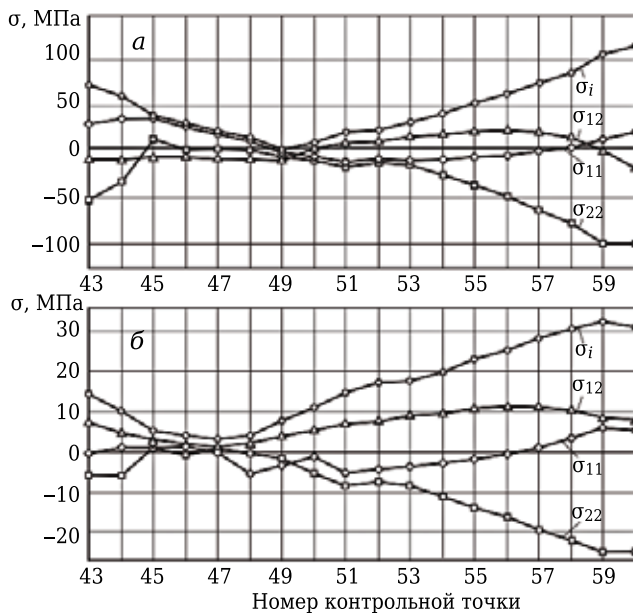


Рис. 4. Напряжения в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики систем (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432 (а) и (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 (б), под действием $F = 0,01$ Н ($\beta = 45^\circ$)

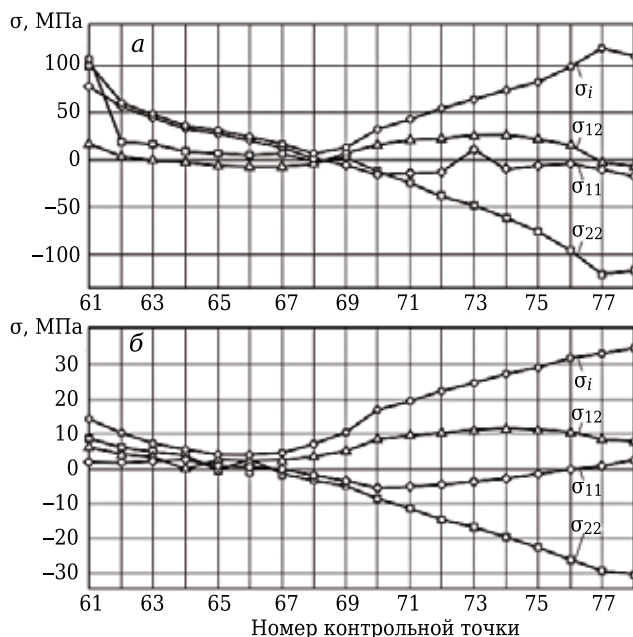


Рис. 5. Напряжения в КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе керамики систем (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432 (а) и (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 (б), под действием $F = 0,01$ Н ($\beta = 45^\circ$)

зерна изменяется в диапазоне 305,6 МПа — от 0,6 МПа в КТ2 до -305 МПа в КТ20 при $\sigma_{ср} = 85,1$ МПа и $s = 80,1$ МПа. Изменение значений интенсивности напряжений σ_i в КТ поверхности зерна имеет достаточно стабильный характер и характеризуется тремя участками. На первом участке между КТ1 и КТ8 зафиксировано равномерное уменьшение σ_i от 64,6 до минимального значения 0,6 МПа; на втором участке между КТ8 и КТ21 — достаточно стабильное увеличение σ_i до

максимального значения 305 МПа; на третьем участке между КТ21 и КТ24 — резкое уменьшение до 62,7 МПа.

В КТ поверхности зерна системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 (см. рис. 2, б) формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 6,7 МПа — от 2 в КТ17 до -4,7 МПа в КТ9 при $\sigma_{ср} = -1$ МПа и $s = 2,1$ МПа. Эти напряжения 4 раза изменяют знак: первый раз — между КТ5 и КТ6, второй — между КТ16 и КТ17, третий — 2 раза — между КТ17 и КТ19, четвертый — между КТ22 и КТ23. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 62,2 МПа — от 13,2 в КТ22 до -49 МПа в КТ10 при $\sigma_{ср} = -12$ МПа и $s = 15,8$ МПа. Кривая 3 раза пересекает нулевую линию — между КТ5 и КТ6, КТ21 и КТ22, КТ23 и КТ24. Напряжения σ_{12} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 27,1 МПа — от 2,2 в КТ5 до 24,9 МПа в КТ22 при $\sigma_{ср} = 10$ МПа и $s = 5,7$ МПа. Видно, что эти растягивающие напряжения не изменяют знака. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности зерна этой системы изменяются в диапазоне 60,4 МПа — от 3,9 в КТ5 до 56,5 МПа в КТ19 при $\sigma_{ср} = 24$ МПа и $s = 15,8$ МПа. Кривая, характеризующая изменения интенсивности напряжений σ_i , так же как и в системе без покрытия, характеризуется 3 участками. На первом участке (между КТ1 и КТ5) зафиксировано равномерное уменьшение σ_i от 14,3 до минимального значения 3,9 МПа; на втором (между КТ3 и КТ19) — достаточно стабильное увеличение σ_i до максимального значения 56,5 МПа; на третьем (между КТ19 и КТ24) — резкое уменьшение до 20 МПа.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432 (см. рис. 3, а), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 86,6 МПа — от 72,2 в КТ26 до -14,4 МПа в КТ34 при $\sigma_{ср} = 9,4$ МПа и $s = 24,6$ МПа. Напряжения σ_{11} изменяют знак между КТ32 и КТ33. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 256,8 МПа — от 152,3 в КТ26 до -104,5 МПа в КТ41 при $\sigma_{ср} = -17,4$ МПа и $s = 61,8$ МПа. Кривая 1 раз пересекает нулевую линию — между КТ33 и КТ34. Напряжения σ_{12} в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, изменяются в диапазоне 36,7 МПа — от 26,4 в КТ38 до -10,3 МПа в КТ41 при $\sigma_{ср} = 7,8$ МПа и $s = 12,3$ МПа. Зафиксировано трехкратное изменение знака напряжений — между КТ28 и КТ29, КТ32 и КТ33, КТ40 и КТ41. Интенсивность напряжений σ_i в КТ этой поверхности изменяется в диапазоне 163,7 МПа — от 3,1 в КТ26 до -160,6 МПа в КТ41 при $\sigma_{ср} = 17,4$ МПа и $s = 9,8$ МПа. Изменение значений интенсивности напряжений σ_i в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, имеет менее стабильный характер по сравнению с показателями, полученными для зерна, и характеризуется присутствием двух максимумов в КТ26 ($\sigma_i = 160,6$ МПа) и КТ41 ($\sigma_i = 102,5$ МПа).

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 (см. рис. 3, б), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 9 МПа — от 3,3 в КТ26 до -5,7 МПа в КТ34 при $\sigma_{ср} = -0,3$ МПа и $s = 3,1$ МПа. Напряжения 3 раза изменяют знак: первый раз — между КТ25 и КТ26, второй — между КТ30 и КТ35, третий — между КТ38 и КТ39. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 40,6 МПа — от 14,7 в КТ26 до -25,9 МПа в КТ40 при $\sigma_{ср} = -8,5$ МПа и $s = 12,4$ МПа. Кривая 2 раза пересекает нулевую линию — между КТ25 и КТ26, КТ29 и КТ30. Напряжения σ_{12} во всех КТ этой поверхности имеют растягивающий характер и изменяются в диапазоне 14,2 МПа — от 2,4 в КТ30 до 11,8 МПа в КТ38 при $\sigma_{ср} = 6,9$ МПа и $s = 3,2$ МПа. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, изменяется в диапазоне 35,3 МПа — от 4,3 в КТ30 до 31 МПа в КТ40 при $\sigma_{ср} = 17,4$ МПа и $s = 9,8$ МПа. Кривая характеризуется присутствием четырех участков: на первом (между КТ25 и КТ26) зафиксировано резкое увеличение σ_i с 10,8 до 17 МПа; на втором (между КТ26 и КТ30) — плавное уменьшение σ_i до максимального значения $\sigma_{ср} = 4,3$ МПа, на третьем (между КТ30 и КТ40) — стабильное увеличение до максимального значения 31 МПа, на четвертом (между КТ40 и КТ42) — уменьшение до 29,6 МПа.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432 (см. рис. 4, а), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 48,8 МПа — от 37,4 в КТ44 до -11,4 МПа в КТ51 при $\sigma_{ср} = 8,4$ МПа и $s = 16,4$ МПа. Напряжения σ_{11} изменяют знак 2 раза: первый раз — между КТ49 и КТ50, второй — между КТ56 и КТ57. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 113,2 МПа — от 13,9 в КТ45 до -99,3 МПа в КТ60 при $\sigma_{ср} = -30,8$ МПа и $s = 35,2$ МПа. Кривая 4 раза пересекает нулевую линию: между КТ44 и КТ45, КТ45 и КТ46, КТ46 и КТ47, КТ49 и КТ50. Напряжения σ_{12} в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, изменяются в диапазоне 40,2 МПа — от 24,6 в КТ56 до -15,6 МПа в КТ60 при $\sigma_{ср} = 5,9$ МПа и $s = 13$ МПа. Зафиксировано изменение знака этих напряжений между КТ49 и КТ50, а также между КТ59 и КТ60. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, характеризуется присутствием двух максимумов — в КТ43 ($\sigma_i = 73$ МПа) и в КТ60 ($\sigma_i = 114,7$ МПа) в диапазоне 115,8 МПа на фоне $\sigma_i = 47,9$ МПа и стандартного $s = 33$ МПа. Между этими КТ интенсивность напряжений σ_i уменьшается до наименьшего значения 1,1 МПа в КТ49.

В КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице керамики системы (TiC-

MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 (см. рис. 4, б), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 12 МПа — от 6,5 в КТ59 до -5,5 МПа в КТ48 при $\sigma_{ср} = -0,04$ МПа и $s = 3,7$ МПа. Эти напряжения 3 раза изменяют знак: первый раз — между КТ43 и КТ44, второй — между КТ47 и КТ48, третий — между КТ56 и КТ57. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 26,2 МПа — от 1,1 в КТ45 до -25,1 МПа в КТ59 при $\sigma_{ср} = -9,9$ МПа и $s = 8,7$ МПа. Кривая 3 раза пересекает нулевую линию — между КТ44 и КТ45, между КТ45 и КТ46, а также между КТ47 и КТ48. Напряжения σ_{12} во всех КТ этой поверхности имеют растягивающий характер и изменяются в диапазоне 13,2 МПа — от 1,8 в КТ47 до 11,4 МПа в КТ56 и КТ57 при $\sigma_{ср} = 6,9$ МПа и $s = 3,4$ МПа. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, изменяется в диапазоне 35,6 МПа — от 3,2 МПа в КТ47 до 32,4 МПа в КТ59 при $\sigma_{ср} = 16,6$ МПа и $s = 10$ МПа. На кривой, характеризующей изменение σ_i в КТ, зафиксированы два участка: на первом участке (между КТ42 и КТ43) наблюдается уменьшение интенсивности напряжений от $\sigma_i = 14,2$ МПа до 3,2 МПа; на втором (между КТ47 и КТ59) — плавное увеличение до максимального значения $\sigma_{ср} = 32,4$ МПа.

В КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432 (см. рис. 5, а), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 94,6 МПа — от 77 в КТ61 до -17,6 МПа в КТ78 при $\sigma_{ср} = 10,6$ МПа и $s = 27,2$ МПа. Установлено, что напряжения σ_{11} изменяют знак 1 раз — между КТ68 и КТ69. Напряжение σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 131,9 МПа — от 100,5 в КТ61 до -121,4 МПа в КТ77 при $\sigma_{ср} = -23,7$ МПа и $s = 55,7$ МПа. Кривая 1 раз пересекает нулевую линию — между КТ69 и КТ77. Напряжения σ_{12} в КТ поверхности матрицы изменяются в диапазоне 33 МПа — от 26,4 в КТ74 до -6,6 МПа в КТ66 при $\sigma_{ср} = 8,3$ МПа и $s = 12,7$ МПа. Зафиксировано трехкратное изменение знака этих напряжений — между КТ63 и КТ64, КТ68 и КТ69, КТ76 и КТ77. Изменение значений интенсивности напряжений σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, имеет весьма стабильный характер и характеризуется присутствием двух максимумов в крайних КТ61 ($\sigma_i = 102,1$ МПа) и КТ77 ($\sigma_i = 117,2$ МПа) в диапазоне 122,9 МПа на фоне среднего значения $\sigma_i = 55,3$ МПа и стандартного отклонения $s = 35$ МПа.

В КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 (см. рис. 5, б), формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в узком диапазоне 7,2 МПа — от 2,8 в КТ63 до -5,4 МПа в КТ70 при $\sigma_{ср} = 0,7$ МПа и $s = 2,9$ МПа. Эти напряжения 2 раза меняют знак: первый раз — между

КТ66 и КТ67, второй — между КТ76 и КТ77. Напряжения σ_{22} в КТ этой поверхности изменяются в диапазоне 38 МПа — от 7,5 в КТ61 до -30,5 МПа в КТ78 при $\sigma_{cp} = -9,5$ МПа и $s = 12,3$ МПа. Кривая пересекает нулевую линию 1 раз — между КТ65 и КТ66. Напряжение σ_{12} во всех КТ этой поверхности имеет растягивающий характер и изменяется в диапазоне 13,5 МПа — от 1,9 в КТ66 до 11,6 МПа в КТ74 при $\sigma_{cp} = 7$ МПа и $s = 3,5$ МПа. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхности межзеренной фазы изменяется в диапазоне 38,6 МПа — от 3,8 в КТ66 до 34,8 МПа в КТ78 при $\sigma_{cp} = 17,1$ МПа и $s = 11,1$ МПа. Кривая характеризуется двумя участками: на первом участке (между КТ61 и КТ66) зафиксировано уменьшение σ_i от 14,3 до 3,8 МПа; на втором (между КТ66 и КТ78) — увеличение σ_i до максимального значения 34,8 МПа.

Влияние покрытия из нитрида титана на стандартное отклонение значений интенсивности напряжений в КТ поверхности разных структурных элементов двух систем показано на рис. 6. Наибольшее значение стандартного отклонения 80 МПа зафиксировано в КТ поверхности зерна керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32, а наименьшее, равное 9,8 МПа, в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-СЧ32. Покрытие уменьшает стандартное отклонение значений интенсивности напряжений в 5,1, 4,1, 3,3 и 3,2 раза в КТ поверхностей зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, матрицы.

Исследовали влияние сосредоточенной силы на напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностей элементов структуры систем (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32 и (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-СЧ32. Для этого конструкцию последовательно нагружали сосредоточенной силой 0,001, 0,005 и 0,01 Н, действующей под

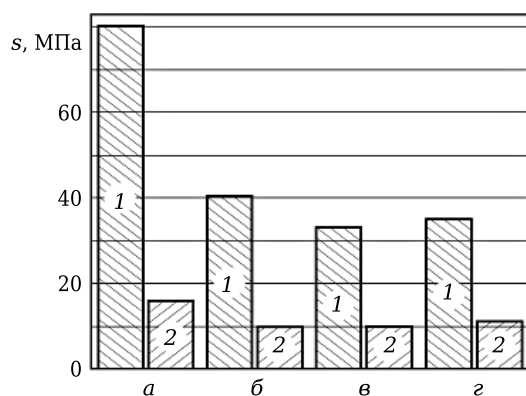


Рис. 6. Стандартное отклонение интенсивности напряжений σ_i в поверхностях зерна (а), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (б), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (в) и к межзеренной фазе (г) керамики систем (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32 (1) и (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-СЧ32 (2), под действием $F = 0,01$ Н ($\beta = 45^\circ$)

углом $\beta = 45^\circ$. Для анализа использовали следующие КТ: КТ21 в поверхности зерна, КТ26 в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, КТ60 в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, КТ77 в поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе. В этих КТ зафиксированы наибольшие значения σ_i в каждой из этих поверхностей керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты этих численных экспериментов относительно интенсивности напряжений σ_i . Видно, что при росте сосредоточенной силы линейно изменяется σ_i . Наиболее заметное влияние зафиксировано в поверхностях структурных элементов системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32, наименьшему влиянию подвержена система (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что покрытие TiN толщиной 5 мкм принципиально не изменяет схему деформирования структурных элементов оксидно-карбидной керамики под действием сосредоточенной силы, но благоприятно влияет на напряженно-деформированное состояние их поверхностей. Во-первых, положительный эффект от покрытия заключается в уменьшении максимальных напряжений. В КТ поверхностей зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, и матрицы максимальные значения напряжений σ_{11} уменьшаются в 13,8, 12,6, 5,8 и 14,3 раза, σ_{22} — в 5,3, 5,9, 4,0 и 4,1 раза, σ_{12}

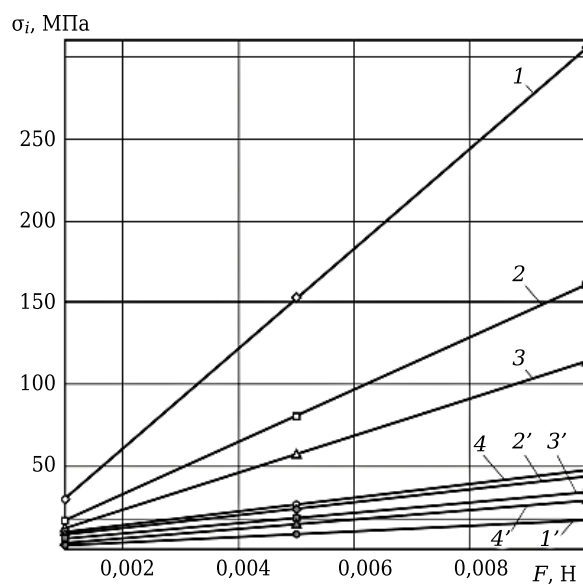


Рис. 7. Влияние величины сосредоточенной силы F ($\beta = 45^\circ$) на интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностей зерна (1, 1'), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (2, 2'), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (3, 3'), матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (4, 4') керамики систем (TiC-MgO-Al₂O₃)-СЧ32 (1-4) и (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-СЧ32 (1'-4')

— в 4,8, 2,21, 2,2 и 2,3 раза, σ_i — в 5,4, 5,2, 3,6 и 3,4 раза соответственно.

Во-вторых, уменьшается уровень неоднородности напряжений в поверхности структурных элементов керамики. В КТ поверхностей зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, и матрицы стандартные отклонения напряжений σ_{11} уменьшаются в 13,1, 7,9, 4,4 и 9,6 раза; σ_{22} — в 4,5, 5, 4,0 и 4,5 раза, σ_{12} — в 5,6, 3,8, 3,8 и 3,6 раза, σ_i — в 5,1, 4,1, 3,3 и 3,2 раза соответственно. Также уменьшается число смен знака напряжений в КТ поверхности структурных элементов керамики, причем в наибольшей мере это проявляется в отношении напряжений σ_{12} . Установлено, что в КТ поверхностей зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, и матрицы керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432 смена знака напряжений произошла 4, 3, 2 и 3 раза соответственно. В КТ поверхностей зерна, межзеренной фазы, примыкающей к матрице, и матрицы керамики системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-TiN-C432 смена знака напряжений

не происходит. Только в КТ поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну керамики этой системы, зафиксирована более частая смена знака напряжений по сравнению с керамикой системы (TiC-MgO-Al₂O₃)-C432.

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

* * *

Данные прикладные научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Уникальный идентификатор проекта — RFMEF157614X0012).

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин [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 нагрузки. Часть 3. Влияние распределенной силовой нагрузки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 42–46.

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 термпрочностных 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.

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. Grigor'ev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 28.05.14

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