

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **М. А. Волосова**, к. т. н. **М. Ю. Федоров**

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

УДК 666.3:546.28'171].017:543.57+539.375

КОМБИНИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ Al_2O_3 -TiC-КЕРАМИКИ С ПОКРЫТИЯМИ AlN И TiN

Приведен анализ влияния покрытий AlN и TiN на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики при воздействии комбинированной нагрузки. Установлены закономерности распределения напряжений и расположения микроструктурных концентраторов напряжений в структурных элементах, образующих поверхностный слой этой керамики.

Ключевые слова: Al_2O_3 -TiC-керамика, поверхностный слой (ПС), покрытия AlN и TiN, комбинированная нагрузка, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений, микроструктурный концентратор напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением работ [1, 2], в которых выполнен анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя (ПС) Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN при воздействии силовой и тепловой нагрузки соответственно. Между тем наиболее распространенный характер нагружения керамических деталей и инструментов при эксплуатации определяется совместным действием силовых и тепловых нагрузок, формирующих специфическое напряженное состояние их ПС. Уровень и распределение микронапряжений, а также расположение микроструктурных концентраторов напряжений определяют особенности разрушения ПС керамики, контактирующего с контртелом, и основную причину отказов деталей и инструментов [3]. В этой связи в настоящей работе поставлена цель — исследовать напряженно-деформированное состояние ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN в условиях совместного действия силовой и тепловой нагрузки.

Численные эксперименты выполнены в автоматизированной системе термпрочностных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы (рис. 1) [4] и метода контрольных точек (КТ) [5]. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i в ПС Al_2O_3 -TiC-

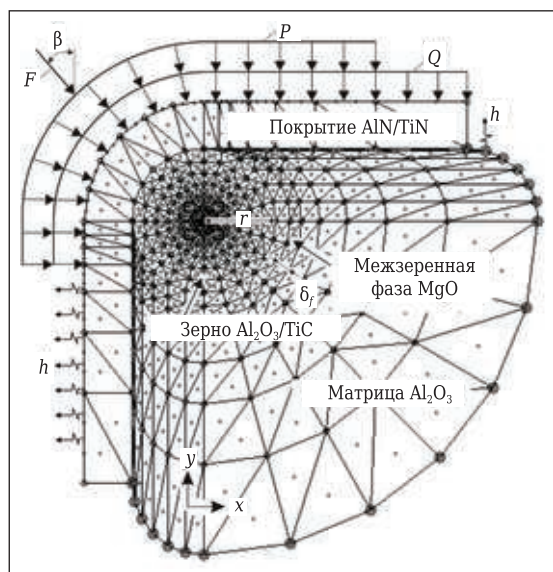


Рис. 1. Расчетная схема

керамики с покрытием четырех систем (№ 1–4, см. таблицу) под действием комбинированной нагрузки, состоящей из сосредоточенной силы $F = 0,02 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$, распределенной силы $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и теплового потока $Q = 9 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$; коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $h = 1 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2\text{-град)}$.

✉
В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

Система	Зерно	Межзеренная фаза	Матрица	Слой
№ 1	Al_2O_3	MgO	Al_2O_3	AlN
№ 2	TiC	MgO	Al_2O_3	AlN
№ 3	Al_2O_3	MgO	Al_2O_3	TiN
№ 4	TiC	MgO	Al_2O_3	TiN

ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием сформирован поверхностями структурных элементов: поверхностью зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C1 — КТ1–КТ18); поверхностью межзеренной фазы, примыкающей к зерну (C2 — КТ19–КТ34); поверхностью межзеренной фазы, примыкающей к матрице (C3 — КТ35–КТ50); поверхностью матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (C4 — КТ51–КТ66); поверхностями зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающими к слою покрытия (C5 — КТ67–КТ82); поверхностью слоя покрытия, примыкающей к зерну, межзеренной фазе и матрице (C6 — КТ83–КТ98).

По результатам расчетов с использованием программного комплекса Statistica определяли статистические характеристики для σ_i в КТ каждой поверхности: наименьшие $\sigma_{\min}$, наибольшие $\sigma_{\max}$, средние $\sigma_{\text{ср}}$; $\Delta\sigma_i$ — диапазон изменения σ_i ; медиану M_e для σ_i ; стандартное отклонение s для σ_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схема деформации ПС Al_2O_3 -TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки показана на рис. 2, а. Видно, что деформация имеет сложный характер. Точка приложения сосредоточенной силы 0 не перемещается относительно исходного контура, сохраняя первоначальное положение под действием сосредоточенной силы. Точки, равноудаленные от нее, упруго перемещаются с характерными признаками выдавливания. Наибольшие значения вертикальных v и горизонтальных u перемещений имеет точка 1, упруго перемещающаяся по стрелке из исходного положения в точку 1'. Результаты расчетов u и v для одинаковых КТ в

ПС керамики разных систем существенно различаются.

Установлено, что поля σ_i , сформировавшиеся в ПС керамики с покрытием четырех систем под действием комбинированной нагрузки, характеризуются наибольшими значениями в локальных объемах слоя покрытия и зерна, находящихся на траектории действия сосредоточенной силы и в локальных объемах границы керамика–покрытие. В качестве примера на рис. 2, б показано поле σ_i в ПС керамики с покрытием системы № 2.

Характер изменения σ_i в разных поверхностях ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3. Видно, что формы кривых для поверхностей C1–C4 существенно не различаются и характеризуются одинаковым расположением КТ с минимальными и максимальными значениями σ_i (см. рис. 3, а–д). Для поверхностей C5 и C6 изменения σ_i описываются однотипными ломаными кривыми с наибольшими значениями σ_i в центральной части (см. рис. 3, д и е).

Кривые изменения σ_i в КТ поверхности C1 ПС керамики систем № 1–4 показаны на рис. 3, а. Видно, что кривые для всех систем имеют однотипную сглаженную форму с наибольшими значениями σ_i в КТ2 и наименьшими в КТ11 и КТ12. Установлено, что в поверхности C1 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 367 ($\sigma_{\min}$) до 894 МПа ($\sigma_{\max}$) при $\Delta\sigma_i = 527$ МПа и $M_e = 543,5$ МПа, системы № 2 — от 420 до 907 МПа при $\Delta\sigma_i = 487$ МПа и $M_e = 562$ МПа, системы № 3 — от 329 до 761 МПа при $\Delta\sigma_i = 432$ МПа и $M_e = 480,5$ МПа, системы № 4 — от 357 до 799 МПа при $\Delta\sigma_i = 442$ МПа и $M_e = 499,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 2 соответственно, наи-

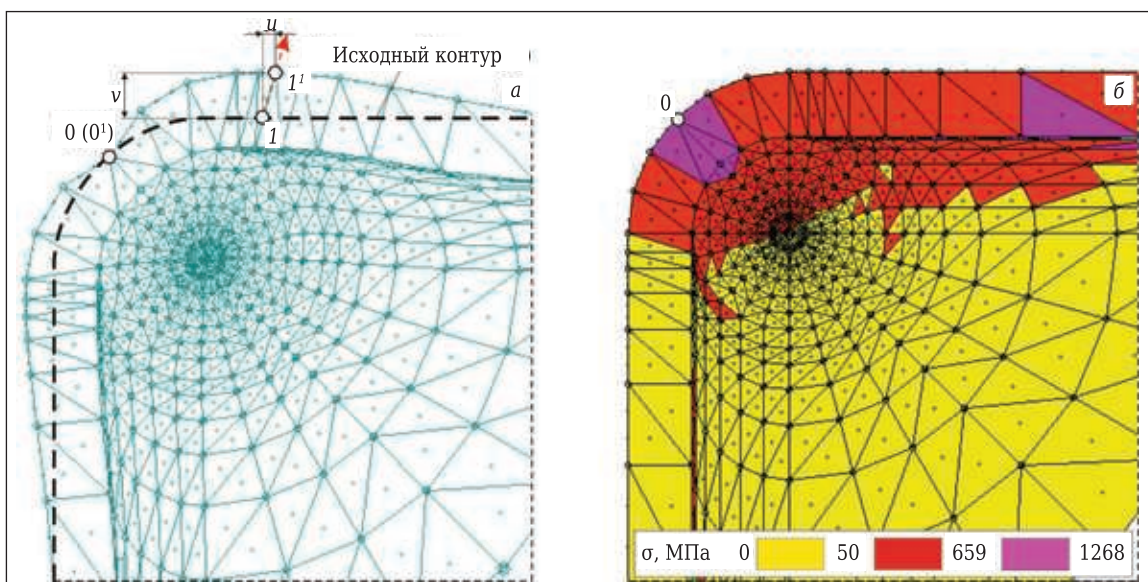


Рис. 2. Схема деформации в ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием системы № 2 (а) и поле σ_i под действием комбинированной нагрузки (б)

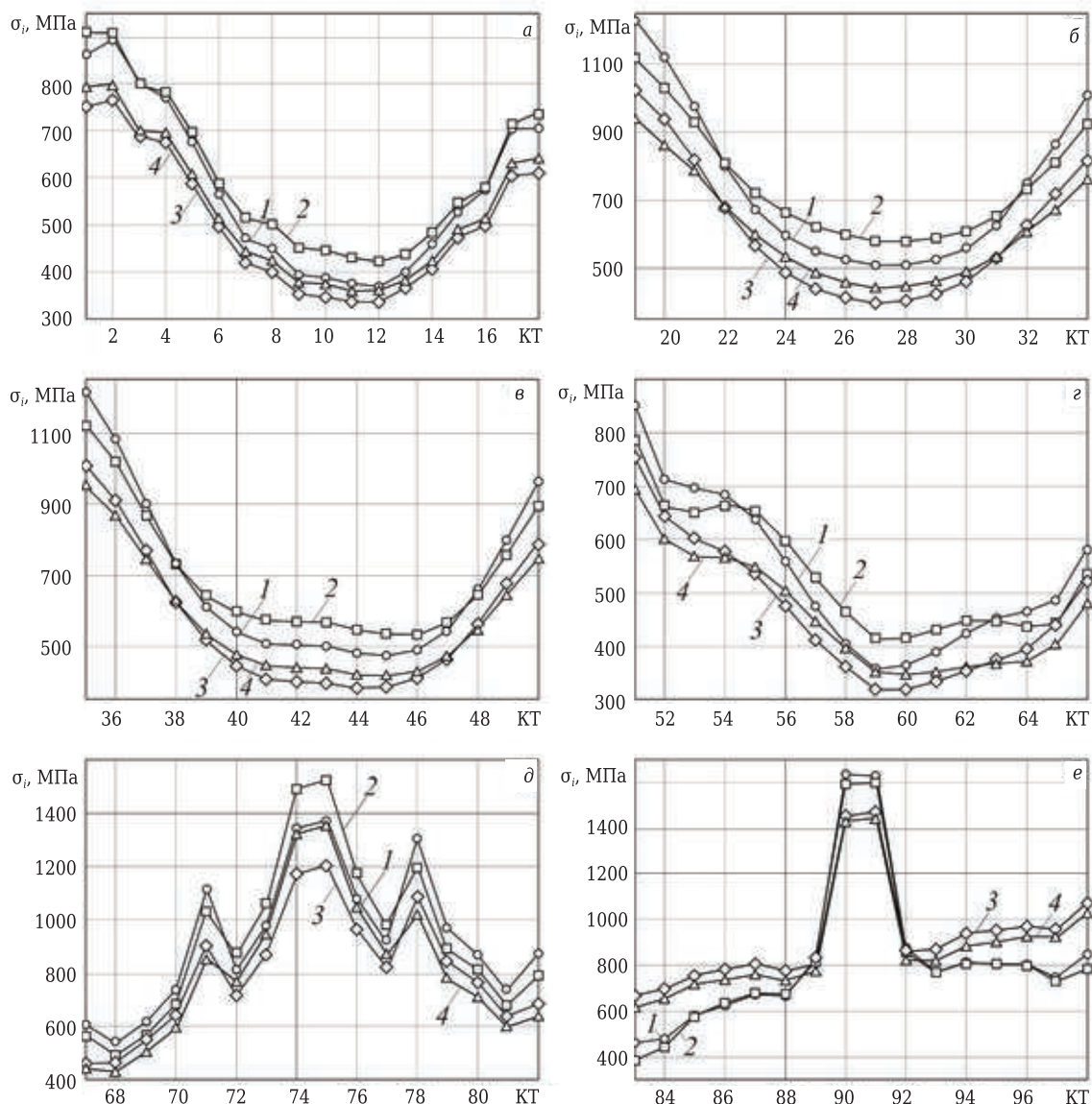


Рис. 3. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 (1–4) под действием комбинированной нагрузки

меньшими — система № 3. Связь систем № 1–4 характеризуется высоким коэффициентом корреляции (0,99), значимым на уровне 0,05.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C2 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, б. Видно, что имеются четыре однотипных кривых сглаженной формы. Особенностью кривых для систем № 1–4 является наибольшая σ_i в КТ19 и наименьшая σ_i в КТ27. В поверхности C2 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 508 до 1231 МПа при $\Delta\sigma_i = 723$ МПа и $M_e = 652,5$ МПа, системы № 2 — от 582 до 119 МПа при $\Delta\sigma_i = 537$ МПа и $M_e = 696$ МПа, системы № 3 — от 398 до 1022 МПа при $\Delta\sigma_i = 624$ МПа и $M_e = 548,5$ МПа, системы № 4 — от 444 до 942 МПа при $\Delta\sigma_i = 498$ МПа и $M_e = 569$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 2, наименьшими — системы № 4 и 3 соответствен-

но. Связь систем № 1–4 по σ_i характеризуется коэффициентом корреляции 0,99.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C3 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, в. На графике имеются четыре однотипных кривых для систем № 1–4. Особенностью этих кривых является наибольшая σ_i в КТ35 и наименьшая σ_i в диапазоне КТ44–КТ46. Установлено, что связь систем № 1–4 по σ_i характеризуется коэффициентом корреляции 0,99. В поверхности C3 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 477 до 1216 МПа при $\Delta\sigma_i = 739$ МПа и $M_e = 579$ МПа, системы № 2 — от 531 до 1122 МПа при $\Delta\sigma_i = 591$ МПа и $M_e = 617,5$ МПа, системы № 3 — от 383 до 1008 МПа при $\Delta\sigma_i = 625$ МПа и $M_e = 491,5$ МПа, системы № 4 — от 417 до 951 МПа при $\Delta\sigma_i = 534$ МПа и $M_e = 506$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуют-

ся системы № 1 и 2, наименьшими — системы № 4 и 3 соответственно.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, г. Графики для этих систем характерны наибольшими значениями σ_i в КТ51 и наименьшими в КТ59 и КТ60. В поверхности С4 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 361 до 853 МПа при $\Delta\sigma_i = 492$ МПа и $M_e = 483,5$ МПа, системы № 2 — от 415 до 788 МПа при $\Delta\sigma_i = 373$ МПа и $M_e = 496$ МПа, системы № 3 — от 321 до 753 МПа при $\Delta\sigma_i = 432$ МПа и $M_e = 427$ МПа, системы № 4 — от 348 до 695 МПа при $\Delta\sigma_i = 347$ МПа и $M_e = 425,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 2, наименьшими — система № 4. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99) для σ_i обладает связь систем № 2, 4, наименьшим (0,95) — связь систем № 2, 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, д. Видно, что на графиках присутствуют четыре ломаные кривые, близкие по форме к кривым с пиковыми значениями σ_i в КТ74 и КТ75. Это свидетельствует о формировании мощных структурных концентраторов напряжений в этой поверхности. Связь систем № 1, 4 по σ_i характеризуется коэффициентом корреляции 0,95, систем № 2, 3 — коэффициентом корреляции 0,98. В поверхности С5 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 538 до 1370 МПа при $\Delta\sigma_i = 832$ МПа

и $M_e = 898,5$ МПа, в системе № 2 — от 497 до 1526 МПа при $\Delta\sigma_i = 1029$ МПа и $M_e = 876$ МПа, в системе № 3 — от 460 до 1203 МПа при $\Delta\sigma_i = 743$ МПа и $M_e = 790,5$ МПа, в системе № 4 — от 432 до 1354 МПа при $\Delta\sigma_i = 922$ МПа и $M_e = 775$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 2 и 1, наименьшими — системы № 3 и 4 соответственно.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, е. Видно, что кривые имеют одинаковую форму, наименьшие значения σ_i располагаются на левом периферийном участке в КТ83 и КТ98, наибольшие — в центральной части кривых (КТ90, КТ91). В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 460 до 1631 МПа при $\Delta\sigma_i = 1171$ МПа и $M_e = 787$ МПа, системы № 2 — от 383 до 1599 МПа при $\Delta\sigma_i = 1216$ МПа и $M_e = 777,5$ МПа, системы № 3 — от 665 до 1467 МПа при $\Delta\sigma_i = 802$ МПа и $M_e = 862,5$ МПа, системы № 4 — от 615 до 1442 МПа при $\Delta\sigma_i = 827$ МПа и $M_e = 822$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 2 и 3, наименьшими — системы № 3 и 2 соответственно. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99) для σ_i обладает связь систем № 1, 2, наименьшим (0,96) — связь систем № 1, 3.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 под действием теплового потока показаны на рис. 4. Видно, что значения σ_i

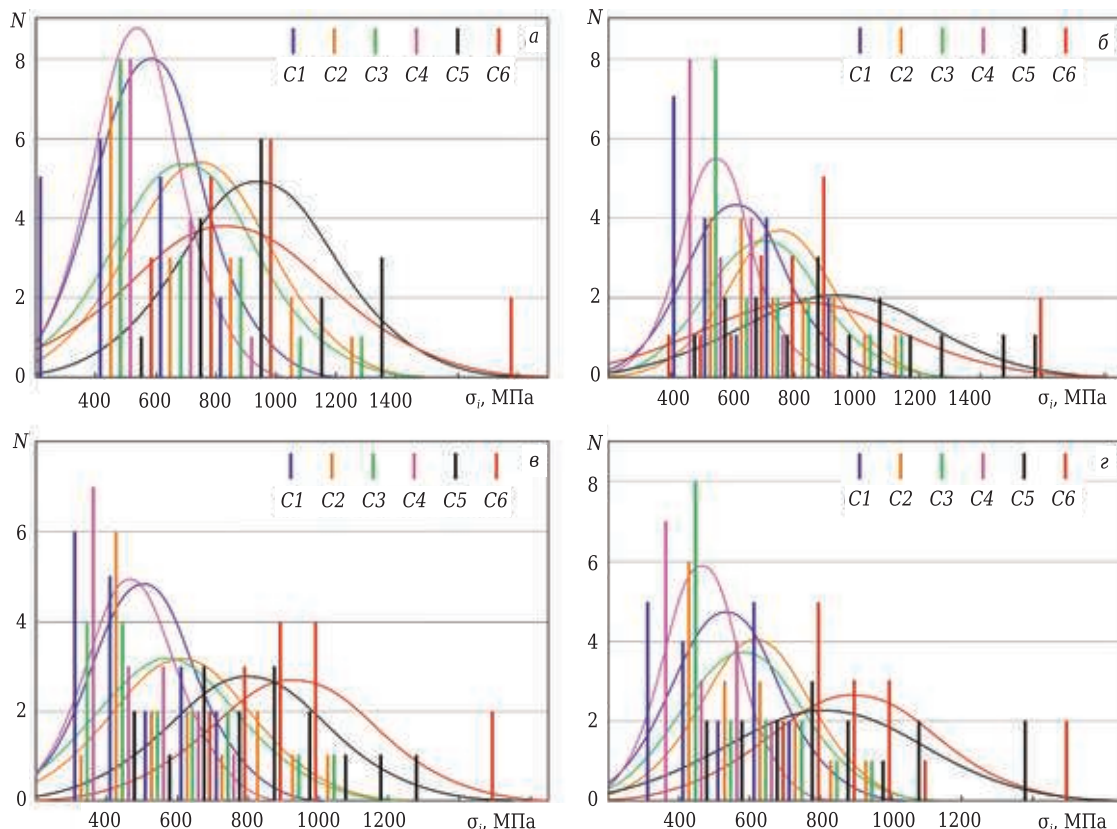


Рис. 4. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 (а–г) под действием комбинированной нагрузки

во всех поверхностях можно считать нормально распределенными, однако значения статистических характеристик для разных систем существенно различаются.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 1 показано на рис. 4, а. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 575,2$ МПа при $s = 179,2$, в поверхности C2 $\sigma_{ср} = 738,8$ МПа при $s = 235,8$, в поверхности C3 $\sigma_{ср} = 689,8$ МПа при $s = 237,6$, в поверхности C4 $\sigma_{ср} = 537,8$ МПа при $s = 145,5$, в поверхности C5 $\sigma_{ср} = 929,2$ МПа при $s = 260,4$, в поверхности C6 $\sigma_{ср} = 828,8$ МПа при $s = 336,6$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 1 характеризуются поверхности C5 и C6 соответственно, наименьшими — поверхность C4. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,7 и 2,3 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 2 показано на рис. 4, б. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 605,8$ МПа при $s = 166,5$, в поверхности C2 $\sigma_{ср} = 750,6$ МПа при $s = 171,7$, в поверхности C3 $\sigma_{ср} = 697,3$ МПа при $s = 185,7$, в поверхности C4 $\sigma_{ср} = 537,2$ МПа при $s = 117,2$, в поверхности C5 $\sigma_{ср} = 926,3$ МПа при $s = 310,3$, в поверхности C6 $\sigma_{ср} = 811,6$ МПа при $s = 334,2$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 2 характеризуются поверхности C5 и C6 соответственно, наименьшими — поверхность C4. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,7 и 2,9 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 3 показано на рис. 4, в. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 500,9$ МПа при $s = 148,4$, в поверхности C2 $\sigma_{ср} = 609,4$ МПа при $s = 201,9$, в поверхности C3 $\sigma_{ср} = 570,8$ МПа при $s = 202,6$, в поверхности C4 $\sigma_{ср} = 465,1$ МПа при $s = 129,6$, в поверхности C5 $\sigma_{ср} = 798,8$ МПа при $s = 229,9$, в поверхности C6 $\sigma_{ср} = 924,7$ МПа при $s = 234,8$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 3 характеризуется поверхность C6, наименьшими — поверхность C4. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 2 и 1,8 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 4 показано на рис. 4, г. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 527,9$ МПа при $s = 151,5$, в поверхности C2 $\sigma_{ср} = 612,7$ МПа при $s = 158,5$, в поверхности C3 $\sigma_{ср} = 576$ МПа при $s = 171,7$, в поверхности C4 $\sigma_{ср} = 460,7$ МПа при $s = 108,6$, в поверхности C5 $\sigma_{ср} = 807,3$ МПа при $s = 281$, в поверхности C6 $\sigma_{ср} = 885,7$ МПа

при $s = 240,2$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 4 характеризуются поверхности C6 и C5 соответственно, наименьшими — поверхность C4. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,9 и 2,6 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комбинированный анализ напряженно-деформированного состояния ПС Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN. Установлено, что при одновременном действии сосредоточенной силы, распределенной силовой нагрузки и теплового потока нулевая точка ПС не изменяет первоначального положения, а точки, равноудаленные от нее, упруго перемещаются с характерными признаками выдавливания. Наибольшие напряжения зафиксированы в локальных объемах покрытия и зерна, находящихся на траектории действия сосредоточенной силы и в локальных объемах границы керамика – покрытие.

Выявлено существенное влияние покрытий AlN и TiN на характер изменения σ_i в поверхностях C1–C6, формирующих ПС Al_2O_3 –TiC-керамики. Наиболее благоприятное напряженно-деформированное состояние под действием комбинированной нагрузки формируется в ПС керамики с покрытием TiN (системы № 3 и 4). Для этих систем фиксировали наименьшие значения показателей $\sigma_{макс}$, $\Delta\sigma_i$, M_e , $\sigma_{ср}$ и s в поверхностях C1–C5. В поверхности C6 для систем № 3 и 4 фиксировали наименьшие значения $\sigma_{макс}$, $\Delta\sigma_i$ и s .

Наименее благоприятное напряженно-деформированное состояние создается в ПС керамики системы № 1, что подтверждается наибольшими значениями $\sigma_{макс}$, $\Delta\sigma_i$, M_e , $\sigma_{ср}$ и s в поверхностях C2, C3 и C4. В поверхностях C1 и C5 наибольшие значения аналогичных показателей отмечены у керамики системы № 2. Установлено, что у этих систем в поверхности C6 зафиксированы наименьшие значения M_e и $\sigma_{ср}$. Выявлено также образование микроструктурных концентраторов напряжений на границе покрытий AlN и TiN с исходной керамикой.

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0707-2020-0025.

Библиографический список

1. Кузин, В. В. Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // Новые огнеупоры. — 2021. — № 6. — С. 64–69.
2. Кузин, В. В. Тепловой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя

Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // Новые огнеупоры. — 2021. — № 7. — С. 57–62.

3. Kuzin, Valery V. A new generation of ceramic tools / Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton [et al.] // Proc. of the 10th International Conference

on Manufacturing Research ICMR-2012. — 2012. — P. 523–528.

4. **Kuzin, V. V.** Basic framework for computer-aided engineering of polished ceramic surface layers / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // *Refract. Ind. Ceram.* — 2020. — Vol. 61, № 3. — P. 349–354.

Кузин, В. В. Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // *Новые огнеупоры.* — 2020. — № 6. — С. 64–69.

5. **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 24.07.21

© В. В. Кузин, М. А. Волосова,
М. Ю. Федоров, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

METALFORUM 2021 — Международная выставка по металлургии, литью и металлообработке



ITM
INDUSTRY EUROPE
31.08-3.09.2021
INDUSTRY
AT DIGITAL AGE
Польша, г. Познань

Профили выставки Metalforum:

- добыча и переработка руд черных и цветных металлов;
- сырье металлургического производства — руды и концентраты, лом, отходы и шлаки;
- машины и оборудование для металлургии — плавильные, отжиговые печи, литейные ковши и др.;
- прессы и экструдеры, молоты и печи для термообработки;
- оборудование для производства труб и проволоки, листа и фольги;
- материалы и добавки — огнеупоры, смеси, стержни, опоки;
- машины и оборудование для очистки и снятия напряжений в отливках;
- машины и оборудование для порошковой металлургии, конвейеры, питатели и др.;
- металлы (чугун, сталь, цветные металлы), сплавы черных и цветных металлов и изделия из них;
- чугунные и стальные трубы;
- проволока, пружины, кабели, цепи;
- продукция порошковой металлургии;
- металлоконструкции для промышленности и строительства;
- ножи, ножницы, пилы, отвертки, сверла и другой ручной и производственный инструмент;
- утилизация лома и отходов металлургического производства;
- научно-исследовательские разработки, услуги, программное обеспечение и др.

www.itm-europe.pl/en