

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]:621.914.22

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

Установлены закономерности влияния покрытий AlN и TiN на напряженно-деформированное состояние структурных элементов Al_2O_3 –TiC-керамики, формирующих ее поверхностный слой, под действием теплового потока. Выявлено образование микроструктурных концентраторов напряжений на границе покрытий AlN и TiN с исходной керамикой.

Ключевые слова: компьютерная инженерия, Al_2O_3 –TiC-керамика, поверхностный слой (ПС), покрытия AlN и TiN, тепловой поток, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений, микроструктурный концентратор напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением статьи [1]. Численные эксперименты выполнены в автоматизированной системе термopочностных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы № 1 (рис. 1) [2] и метода контрольных точек (КТ) [3]. Конструкцию нагружали тепловым потоком $Q = 9 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$; коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $h = 1 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2\text{·град)}$. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i и температур T в шести поверхностях C1–C6 (см. таблицу) Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN четырех систем: № 1 — Al_2O_3 (зерно) – MgO (межзеренная фаза) – Al_2O_3 (матрица) – AlN (покрытие), № 2 — TiC–MgO– Al_2O_3 –AlN, № 3 — Al_2O_3 –MgO– Al_2O_3 –TiN и № 4 — TiC–MgO– Al_2O_3 –TiN.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичное температурное поле в ПС Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытием, образовавшееся под

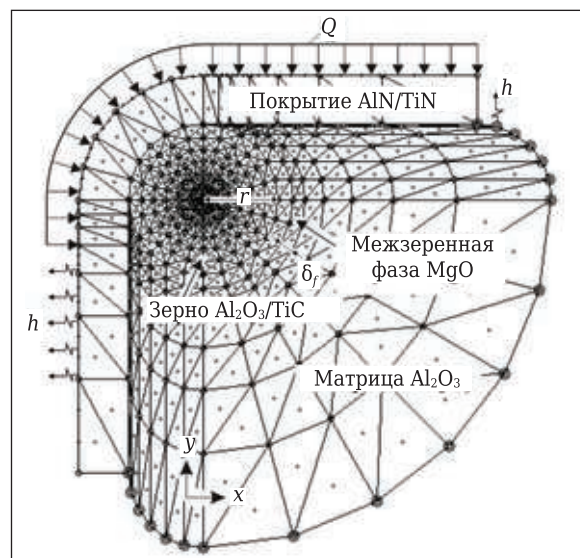


Рис. 1. Расчетная схема

Обозначение поверхности	Выделенные поверхности, формирующие ПС Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями	Номер КТ
C1	Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе	КТ1–КТ18
C2	Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну	КТ19–КТ34
C3	Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице	КТ35–КТ50
C4	Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе	КТ51–КТ66
C5	Поверхности зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающие к слою покрытия	КТ67–КТ82
C6	Поверхность слоя покрытия, примыкающая к зерну, межзеренной фазе и матрице	КТ83–КТ98



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

действием теплового потока, показано на примере керамики с покрытием системы № 4 (рис. 2, а). Установлено, что вид системы не влияет на форму изотерм, ориентированных относительно точки 0, но существенно влияет на удаленность изотерм с одинаковой температурой от точки 0. Это означает сильную зависимость вида системы от градиента температур: в ПС керамики системы № 4 зафиксирован наибольший градиент температур, системы № 1 — наименьший. Наибольшая T формируется в поверхности Сб (рис. 2, б), причем максимальная T зафиксирована в системе № 1, а минимальная — в системе № 4. В поверхности Сб керамики системы № 1 T изменяется от 319 ($T_{\min}$) до 770 °С ($T_{\max}$) при $T_{\text{ср}} = 624,3$ °С и $s = 132,4$, системы № 2 — от 304 до 610 °С при $T_{\text{ср}} = 526,1$ °С и $s = 86,3$, системы № 3 — от 220 до 408 °С при $T_{\text{ср}} = 352,6$ °С и $s = 54,3$, системы № 4 — от 215 до 376 °С при $T_{\text{ср}} = 330,9$ °С и $s = 46$.

Схема деформации ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием под действием теплового потока, типичная для всех систем, показана на рис. 3, а.

Деформация происходит в результате выдавливания локального поверхностного объема конструкции. Видно, что наибольшие горизонтальные u и вертикальные v перемещения имеет покрытие в точке 0, которая перемещается по стрелке в точку 0¹, причем значения u и v для выделенных КТ уменьшаются при увеличении расстояния между ними и точкой 0. Результаты расчетов u и v для одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются.

Установлено, что поля σ_i , сформировавшиеся в ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием четырех систем под действием теплового потока, характеризуются наибольшими значениями на отдельных участках границы керамика – покрытие, в которых значения σ_i достигают максимума. В качестве примера на рис. 3, б показано поле σ_i в ПС керамики с покрытием системы № 2.

Характер изменения σ_i в разных поверхностных ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием под действием теплового потока показан на рис. 4. Видно, что форма кривых для разных поверхностей существенно различается, за исключением

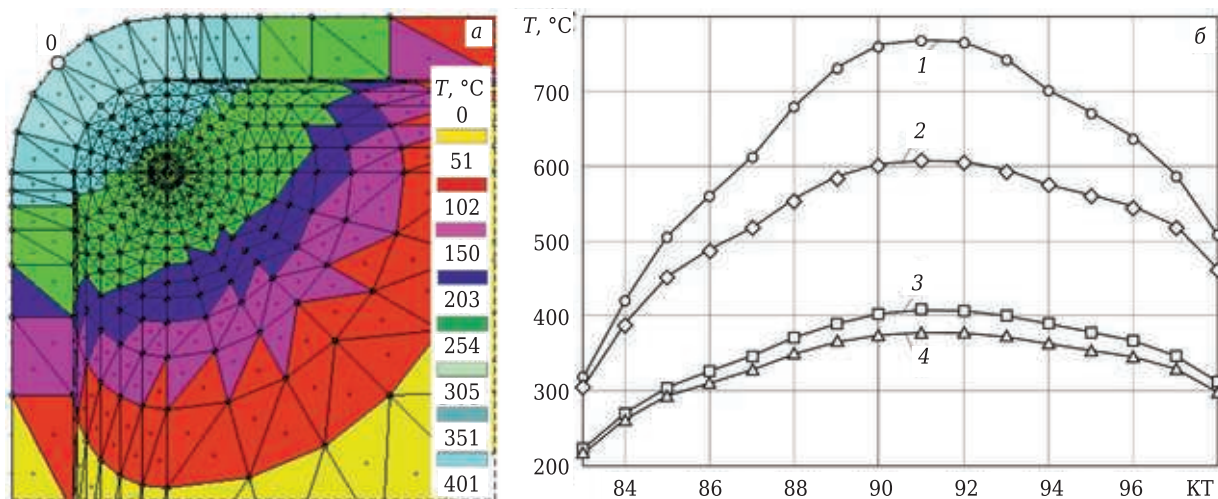


Рис. 2. Температурное поле в ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием системы № 4 (а) и характер изменения T в поверхности Сб систем № 1–4 (1–4) под действием теплового потока (б)

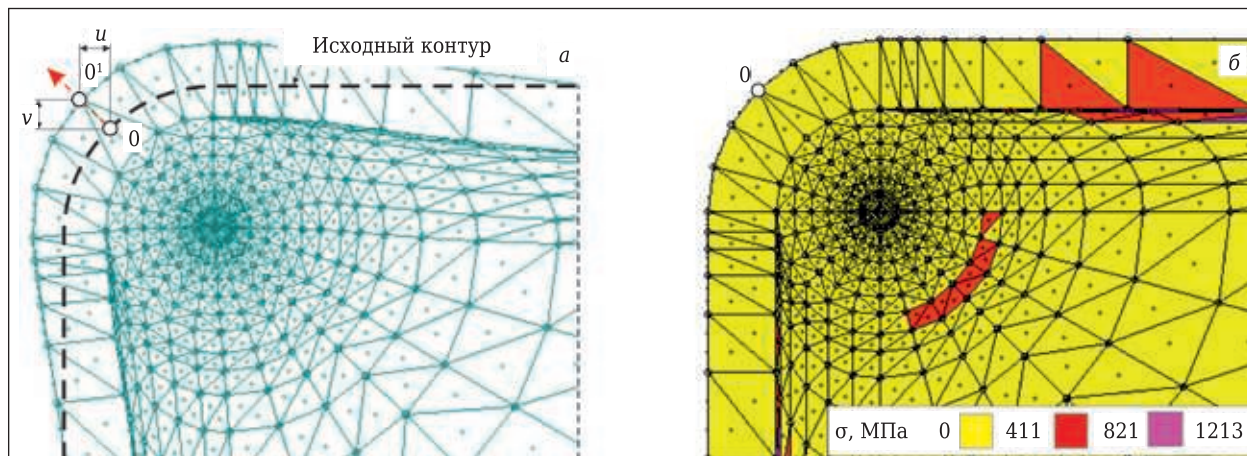


Рис. 3. Схема деформации (а) и поле σ_i в ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием системы № 2 под действием теплового потока (б)

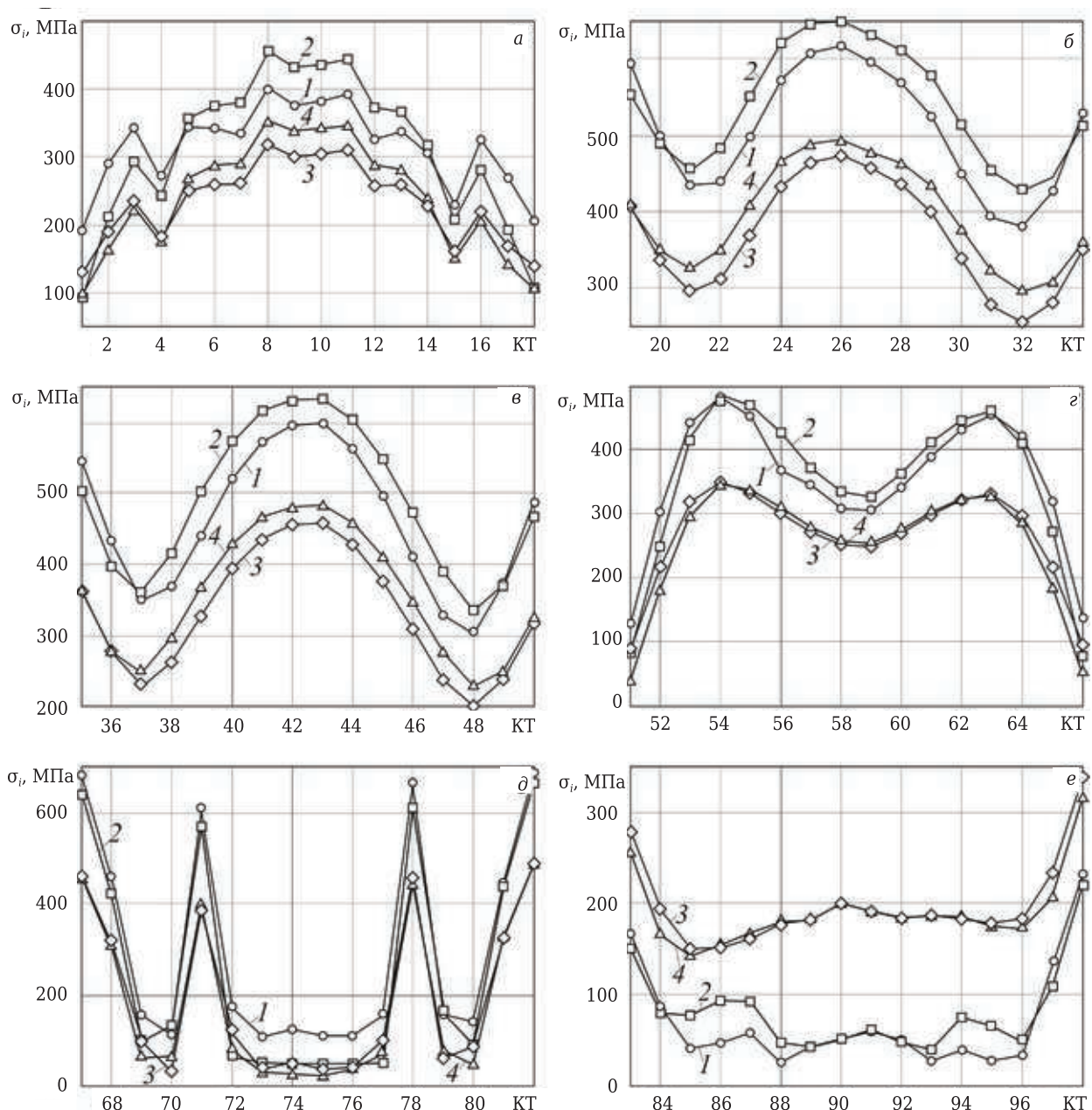


Рис. 4. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 (1–4) под действием теплового потока

кривых для поверхностей C2 и C3 (см. рис. 4, б и в), на которых форма кривых совпадает. Общий признак графиков, описывающих характер изменения σ_i в поверхностях Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием, — парное расположение кривых для систем № 1, 2 и 3, 4 для поверхностей C2, C3, C4 и C6 (см. рис. 4, б, в, г и е).

Кривые изменения σ_i в КТ поверхности C1 ПС керамики систем № 1–4 показаны на рис. 4, а. Видно, что кривые для всех систем имеют однотипную ломаную форму с наибольшими значениями σ_i в КТ8. Установлено, что в поверхности C1 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 193 ($\sigma_{\min}$) до 403 МПа ($\sigma_{\max}$) при $\Delta\sigma_i = 210$ МПа и

$M_e = 331$ МПа, системы № 2 — от 92 до 456 МПа при $\Delta\sigma_i = 364$ МПа и $M_e = 338,5$ МПа, системы № 3 — от 127 до 317 МПа при $\Delta\sigma_i = 190$ МПа и $M_e = 241,5$ МПа, системы № 4 — от 95 до 352 МПа при $\Delta\sigma_i = 257$ МПа и $M_e = 251,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 2, наименьшими — система № 3. Наибольшим коэффициентом корреляции для σ_i (0,99), значимым на уровне 0,05, обладает связь систем № 2, 3, наименьшим (0,95) — связь систем № 1, 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C2 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, б. Видно, что имеются две пары однотипных кривых сглаженной формы: первая для систем № 1, 2,

вторая для систем № 3, 4. Особенностью кривых для систем № 1–4 является наибольшая σ_i в КТ26 и наименьшая σ_i в КТ32. В поверхности С2 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 383 до 620 МПа при $\Delta\sigma_i = 237$ МПа и $M_e = 515,5$ МПа, системы № 2 — от 428 до 650 МПа при $\Delta\sigma_i = 222$ МПа и $M_e = 535,5$ МПа, системы № 3 — от 255 до 473 МПа при $\Delta\sigma_i = 218$ МПа и $M_e = 361,5$ МПа, системы № 4 — от 295 до 495 МПа при $\Delta\sigma_i = 200$ МПа и $M_e = 391$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 2, наименьшими — системы № 4 и 3 соответственно. Связь систем № 1, 2 по σ_i характеризуется коэффициентом корреляции 0,93, систем № 3, 4 — коэффициентом корреляции 0,99.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, в. Видно, что имеются две пары однотипных кривых для систем № 1, 2 и № 3, 4. Особенностью кривых для систем № 1–4 является наибольшая σ_i в КТ43 и наименьшая σ_i в КТ48. Установлено, что связь систем № 1, 2 по σ_i характеризуется коэффициентом корреляции 0,95, а систем № 3, 4 — коэффициентом корреляции 0,99. В поверхности С3 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 302 до 598 МПа при $\Delta\sigma_i = 296$ МПа и $M_e = 467,5$ МПа, системы № 2 — от 336 до 633 МПа при $\Delta\sigma_i = 297$ МПа и $M_e = 487$ МПа, системы № 3 — от 200 до 457 МПа при $\Delta\sigma_i = 257$ МПа и $M_e = 323,5$ МПа, системы № 4 — от 228 до 484 МПа при $\Delta\sigma_i = 256$ МПа и $M_e = 355,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 2, наименьшими — системы № 4 и 3 соответственно.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, г. Видно, что присутствуют две пары кривых одинаковой формы для систем № 1, 2 и № 3, 4. Кривые имеют два периферийных участка: на левом участке (КТ51–КТ54) напряжения интенсивно увеличиваются, на правом (КТ63–КТ66) уменьшаются.

В поверхности С4 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 129 до 484 МПа при $\Delta\sigma_i = 355$ МПа и $M_e = 358$ МПа, системы № 2 — от 69 до 479 МПа при $\Delta\sigma_i = 410$ МПа и $M_e = 384$ МПа, системы № 3 — от 86 до 349 МПа при $\Delta\sigma_i = 263$ МПа и $M_e = 283$ МПа, системы № 4 — от 41 до 348 МПа при $\Delta\sigma_i = 307$ МПа и $M_e = 284$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 2, наименьшими — система № 3. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99) для σ_i обладает связь систем № 2, 3, наименьшим (0,95) — связь систем № 1, 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, д. Видно, что присутствуют четыре близкие по форме кривые сложной ломаной формы с пиковыми значениями σ_i в КТ67, КТ71, КТ78 и КТ82. Это свидетельствует о формировании мощных

структурных концентраторов напряжений в этой поверхности. Связь систем № 1–4 по σ_i характеризуется коэффициентом корреляции не менее 0,98. В поверхности С5 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 107 до 684 МПа при $\Delta\sigma_i = 577$ МПа и $M_e = 156,5$ МПа, системы № 2 — от 49 до 668 МПа при $\Delta\sigma_i = 619$ МПа и $M_e = 117,5$ МПа, системы № 3 — от 92 до 485 МПа при $\Delta\sigma_i = 456$ МПа и $M_e = 96$ МПа, системы № 4 — от 25 до 491 МПа при $\Delta\sigma_i = 466$ МПа и $M_e = 77$ 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. 4, е. Видно, что кривые для всех систем имеют сходную форму — наибольшие значения σ_i распределяются на периферийных участках в КТ83 и КТ98 и на участке в центральной части кривых от КТ85 до КТ96, на котором напряжения изменяются незначительно. В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 27 до 232 МПа при $\Delta\sigma_i = 205$ МПа и $M_e = 49$ МПа, системы № 2 — от 40 до 220 МПа при $\Delta\sigma_i = 180$ МПа и $M_e = 71,5$ МПа, системы № 3 — от 150 до 337 МПа при $\Delta\sigma_i = 187$ МПа и $M_e = 184$ МПа, системы № 4 — от 144 до 318 МПа при $\Delta\sigma_i = 174$ МПа и $M_e = 184,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 4, наименьшими — системы № 4 и 1 соответственно. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,98) для σ_i обладает связь систем № 3, 4, наименьшим (0,83) — связь систем № 2, 3.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 под действием теплового потока показаны на рис. 5. Видно, что значения σ_i во всех поверхностях можно считать нормально распределенными, однако значения статистических характеристик для разных систем существенно различаются.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 1 показано на рис. 5, а. Установлено, что в поверхности С1 $\sigma_{ср} = 316,4$ МПа при $s = 61,5$, в поверхности С2 $\sigma_{ср} = 509,6$ МПа при $s = 80,2$, в поверхности С3 $\sigma_{ср} = 461,6$ МПа при $s = 98,9$, в поверхности С4 $\sigma_{ср} = 353,6$ МПа при $s = 104,3$ в поверхности С5 $\sigma_{ср} = 303,3$ МПа при $s = 235,7$, в поверхности С6 $\sigma_{ср} = 70,7$ МПа при $s = 57,7$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 1 характеризуются поверхности С2 и С5, наименьшими — поверхность С6. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 7,2 и 4,1 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 2 показано на рис. 5, б. Установлено, что в поверхности С1 $\sigma_{ср} = 310,7$ МПа при $s = 112,4$, в поверхности С2 $\sigma_{ср} = 539,9$ МПа при $s = 77,1$, в поверхности С3 $\sigma_{ср} = 488,8$ МПа при $s = 103$, в поверхности С4

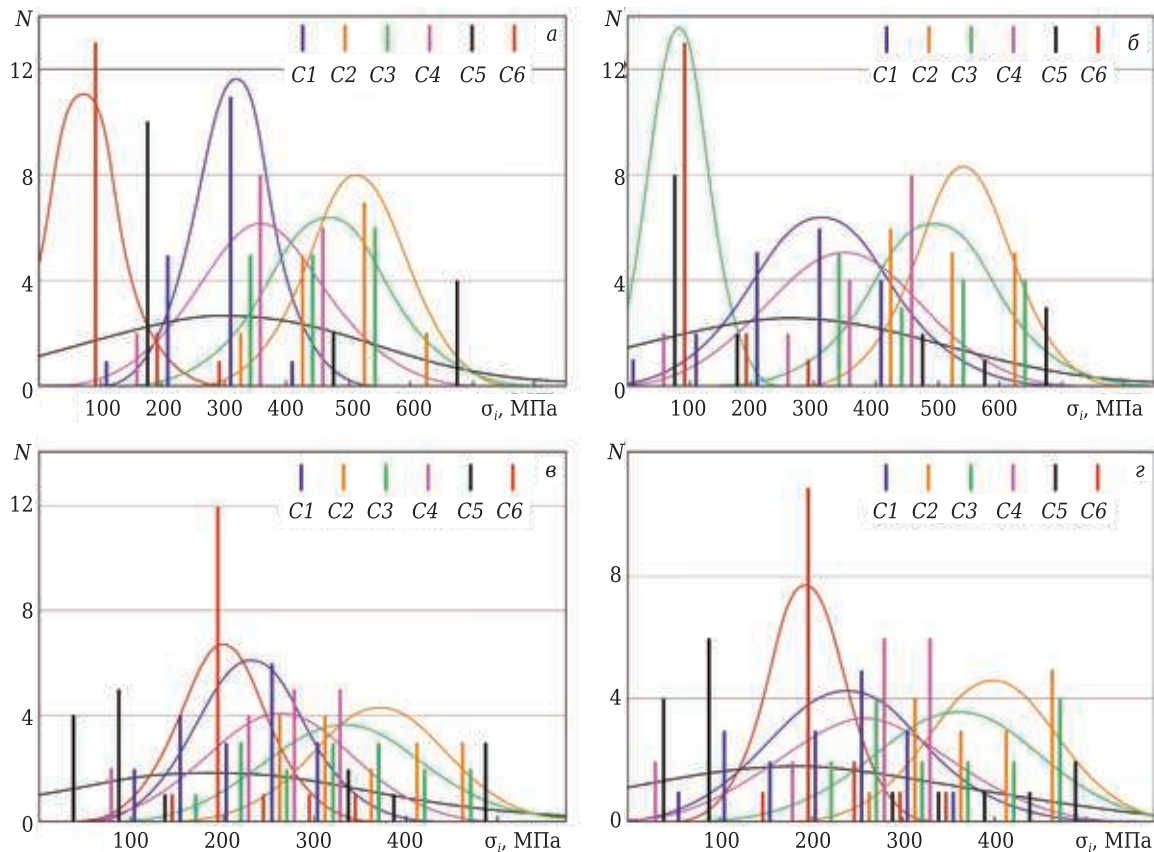


Рис. 5. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 (а–г) под действием теплового потока

$\sigma_{\text{ср}} = 344,4$ МПа при $s = 125$, в поверхности C5 $\sigma_{\text{ср}} = 260,1$ МПа при $s = 248,2$, в поверхности C6 $\sigma_{\text{ср}} = 82$ МПа при $s = 46,9$. Наибольшими значениями $\sigma_{\text{ср}}$ и s в системе № 2 характеризуются соответственно поверхности C2 и C5, наименьшими — поверхность C6. Наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 6,6 и 5,3 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 3 показано на рис. 5, в. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{\text{ср}}$ составляет $\sigma_{\text{ср}} = 230,3$ МПа при $s = 59,1$, в поверхности C2 $\sigma_{\text{ср}} = 367,5$ МПа при $s = 72,7$, в поверхности C3 $\sigma_{\text{ср}} = 331,8$ МПа при $s = 86,7$, в поверхности C4 $\sigma_{\text{ср}} = 261,9$ МПа при $s = 78,1$, в поверхности C5 $\sigma_{\text{ср}} = 191,5$ МПа и $s = 176,7$, в поверхности C6 $\sigma_{\text{ср}} = 198,3$ МПа при $s = 48$. Наибольшими значениями $\sigma_{\text{ср}}$ и s в системе № 3 характеризуются поверхности C2 и C5, наименьшими — поверхности C5 и C6 соответственно. Наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,9 и 3,7 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 4 показано на рис. 5, г. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{\text{ср}} = 236,9$ МПа при $s = 84,6$, в поверхности C2 $\sigma_{\text{ср}} = 395,9$ МПа при $s = 69,2$, в поверхности C3 $\sigma_{\text{ср}} = 357,9$ МПа при $s = 89,1$, в поверхности C4 $\sigma_{\text{ср}} = 255,2$ МПа

при $s = 94,6$, в поверхности C5 $\sigma_{\text{ср}} = 185,2$ МПа при $s = 180,4$, в поверхности C6 $\sigma_{\text{ср}} = 193$ МПа при $s = 41,7$. Наибольшими значениями $\sigma_{\text{ср}}$ и s в системе № 4 характеризуются поверхности C2 и C5, наименьшими — поверхности C5 и C6 соответственно. Наибольшие значения $\sigma_{\text{ср}}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 2,1 и 4,3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теплового анализа напряженно-деформированного состояния ПС Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN установлено, что под действием теплового потока наибольшая T формируется в поверхности C6, причем максимальная T зафиксирована в системе № 1, а минимальная в системе № 4. Деформация ПС керамики происходит путем выдавливания локального поверхностного объема конструкции. Наибольшие напряжения зафиксированы на границе 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 теплового потока формируется в ПС

керамики с покрытием системы № 3. Для этой системы фиксировали наименьшие значения показателей $\sigma_{\text{макс}}$, $\Delta\sigma_i$, M_e , $\sigma_{\text{ср}}$ и s в поверхностях C1, C2, C3 и C4. В поверхности C5 наименьшие значения показателей $\sigma_{\text{макс}}$, $\Delta\sigma_i$ и s зафиксированы в ПС керамики системы № 3, а показателей M_e и $\sigma_{\text{ср}}$ — в ПС керамики системы № 4. В поверхности C6 распределение наименьших статистических показателей по системам керамики неоднозначно.

Наименее благоприятное напряженно-деформированное состояние ПС под действием теплового потока создается в ПС керамики системы № 2, что подтверждается наибольшими значениями основных показателей $\sigma_{\text{макс}}$, $\Delta\sigma_i$, M_e , $\sigma_{\text{ср}}$ и s в поверхностях C1, C2, C3 и C4. В поверхности C5 наибольшие значения аналогичных показателей отмечены у керамики систем № 1 и 2. 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. Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 6. — С. 64–69.
3. 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 24.06.21

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

IV международная научно-практическая конференция «ГРАФЕН И РОДСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ: СИНТЕЗ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ»

6–8 октября 2021 г.

г. Тамбов, Россия

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- углеродные нанотрубки и нановолокна
- графен, нанографит
- наноматериалы функционального и конструкционного назначения
- метрология, стандартизация и контроль продуктов углеродной nanoиндустрии

Конференция пройдет в Тамбовском государственном техническом университете. Рабочие языки конференции — русский и английский. Форма участия в конференции — очная, заочная, дистанционная. Типы сообщений — пленарные, секционные и стендовые доклады.

www.graphene-tambov.ru