

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

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

УДК 666.3:546.28'171]:621.914.22

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

С использованием методологии компьютерной инженерии установлены закономерности напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN под действием силовой нагрузки. Определены особенности влияния покрытий AlN и TiN на характер изменения интенсивности напряжений в поверхностях структурных элементов, формирующих поверхностный слой Al_2O_3 -TiC-керамики. 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, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений, концентратор напряжений, дефект.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка заготовок из Al_2O_3 -TiC-керамики шлифованием сопровождается образованием в поверхностном слое (ПС) многочисленных дефектов, инициирующих процессы разрушения керамики при эксплуатации изделий [1, 2]. Выявленная природа формирования дефектного ПС при шлифовании определяет необходимость существенного усложнения технологического процесса изготовления высококачественных керамических деталей и инструментов [3]. В частности, создание бездефектного ПС на керамике достигается операциями доводки и полирования поверхностей на специальных высокоточных станках с поэтапным уменьшением зернистости алмазной пасты [4]. Однако эти операции имеют существенные ограничения по обработке сложнопрофильных поверхностей и значительно увеличивают трудозатраты на изготовление.

Альтернативным вариантом решения проблемы дефектного ПС на керамике после шлифования является метод залечивания дефектов (defect healing), ориентированный на уменьшение концентрации технологических дефектов и улучшение функциональных свойств за счет

использования физико-химических эффектов [5–9]. Для залечивания открытых поверхностных дефектов рекомендуется наносить покрытие на рабочие поверхности деталей и инструментов на заключительном этапе их изготовления [10]. Механизм залечивания этих дефектов основан на заполнении их открытых полостей осаждаемым материалом, причем оптимальные условия для действия этого механизма создаются с учетом степени дефектности исходного ПС за счет управления режимами нанесения покрытия [11].

Наиболее перспективными для залечивания поверхностных дефектов керамики являются одно- и многослойные покрытия на основе системы Ti-Al-N, обладающие благоприятным комплексом показателей прочности, твердости, химической инертности и ударной стойкости [12–14]. Однако на этапе проектирования залечивания поверхностных дефектов важно оценить степень влияния этого нового структурного элемента на напряженно-деформированное состояние ПС керамики [15]. В настоящее время данные, позволяющие выполнить этот анализ, отсутствуют. В этой связи предложено использовать методологию компьютерной инженерии ПС керамики, которую ранее успешно применяли для исследования напряженно-деформированного состояния ПС шлифованной керамики [16].

Цель работы — адаптировать ранее созданную методику компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики для решения задачи залечивания поверхностных дефектов и апробировать ее при силовом анализе



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

напряженно-деформированного состояния ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN. В последующих статьях будут представлены результаты теплового и комбинированного анализов. Авторы рассматривают эти результаты как очередной этап в создании интегрированной компьютерной инженерии высокоплотных керамических материалов.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Силовой анализ напряженно-деформированного состояния ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN выполнен с использованием усовершенствованной методики компьютерной инженерии ПС керамики. Для проведения численных экспериментов использовали расчетную схему № 1 (рис. 1) и автоматизированную систему термочностных расчетов KS-SL v.1.0 [16]. Расчетная схема представлена в виде конструкции, состоящей из зерна круглой формы радиусом r 3 мкм, межзеренной фазы толщиной $\delta_f = 0,06$ мкм, матрицы и покрытия толщиной 2 мкм. Эту конструкцию нагружали сосредоточенной силой ($F = 0,02$ Н, $\beta = 45^\circ$) и распределенной силовой нагрузкой $P = 5 \cdot 10^8$ Па. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i в структурных элементах, образующих ПС 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; № 4 — TiC-MgO- Al_2O_3 -TiN. Свойства соединений, образующих эти системы, приведены в таблице.

Для сравнительной оценки σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [17]. Выделенные КТ располагались в поверхности: зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C1 — КТ1-КТ18), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (поверхность C2 — КТ19-КТ34), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (поверхность C3 — КТ35-КТ50), матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C4 — КТ51-КТ66), в поверхностях зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к слою покрытия (поверхность C5 — КТ67-КТ82), в поверхности слоя покрытия, примыкающего к зерну, межзеренной фазе и матрице (поверхность C6 — КТ83-КТ98).

По результатам расчетов определяли следующие статистические характеристики для σ_i :

Соединение	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	ТКЛР (20-1500 °C) $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/град
Al_2O_3	4,0	380	0,24	8,5
TiC	4,9	484	0,22	7,95
MgO	3,4	315	0,18	13,4
AlN	3,26	340	0,20	6,5
TiN	5,44	440	0,25	9,3

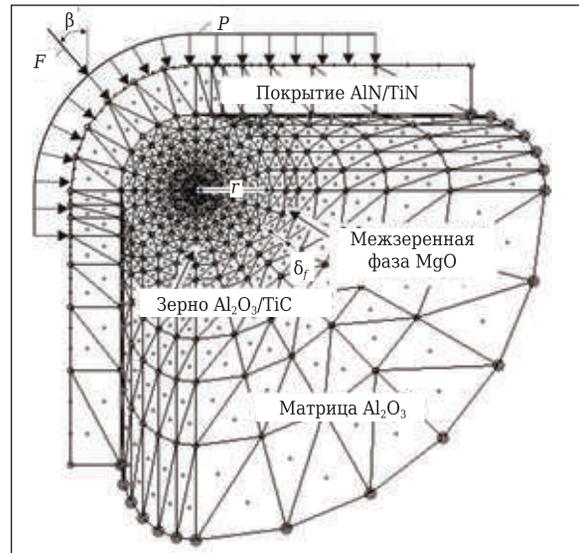


Рис. 1. Расчетная схема

КТ каждой поверхности: наименьшие σ_{\min} , наибольшие σ_{\max} , средние $\sigma_{\text{ср}}$ и стандартное отклонение s для σ_i . Статистический анализ данных выполняли с использованием программного комплекса Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Деформация ПС керамики с покрытием всех систем под действием силовой нагрузки происходит в результате вдавливания локального поверхностного объема конструкции. В качестве примера на рис. 2, а показана схема деформации керамики системы № 2. Видно, что наибольшие горизонтальные u и вертикальные v перемещения имеет покрытие в точке 0 (точка приложения сосредоточенной силы), 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 с покрытием разных систем существенно различаются. Установлено, что поля σ_i , сформировавшиеся в ПС керамики с покрытием четырех систем под действием силовой нагрузки, характеризуются наибольшими значениями в покрытии и в локальном объеме зерна, находящемся на траектории действия сосредоточенной силы (рис. 2, б).

Характер изменения σ_i в разных поверхностях ПС керамики с покрытием четырех систем под действием силовой нагрузки показан на рис. 3. Графики для поверхностей C1-C4 (см. рис. 3, а-г) характеризуются кривыми сглаженной формы, а в центральной части кривых для поверхностей C5 и C6 (см. рис. 3, д, е) присутствуют пиковые значения σ_i . Связь систем № 1-4 характеризуется высоким коэффициентом корреляции (0,99) для σ_i .

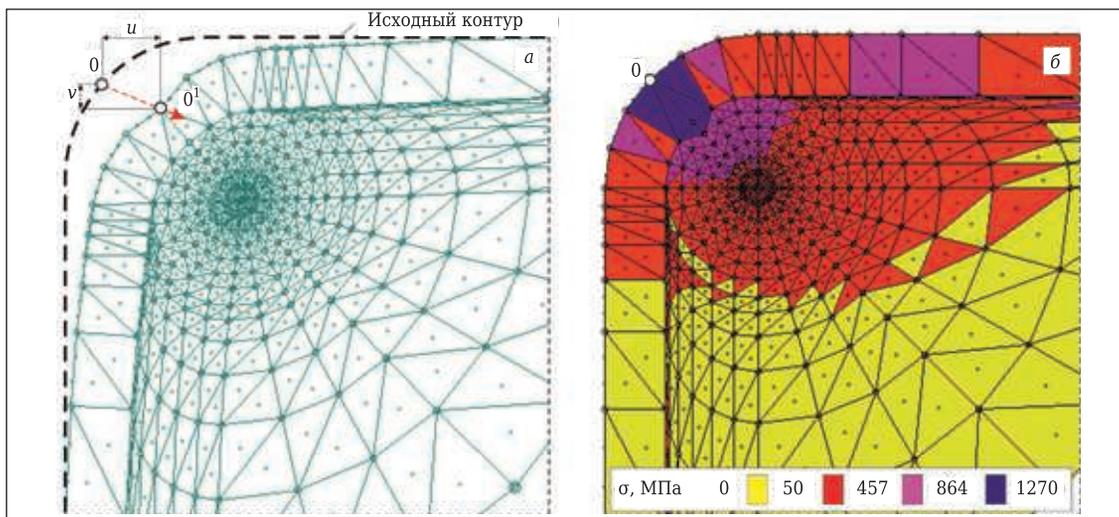


Рис. 2. Схема деформации и поле σ_i в ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием системы № 2 под действием силовой нагрузки

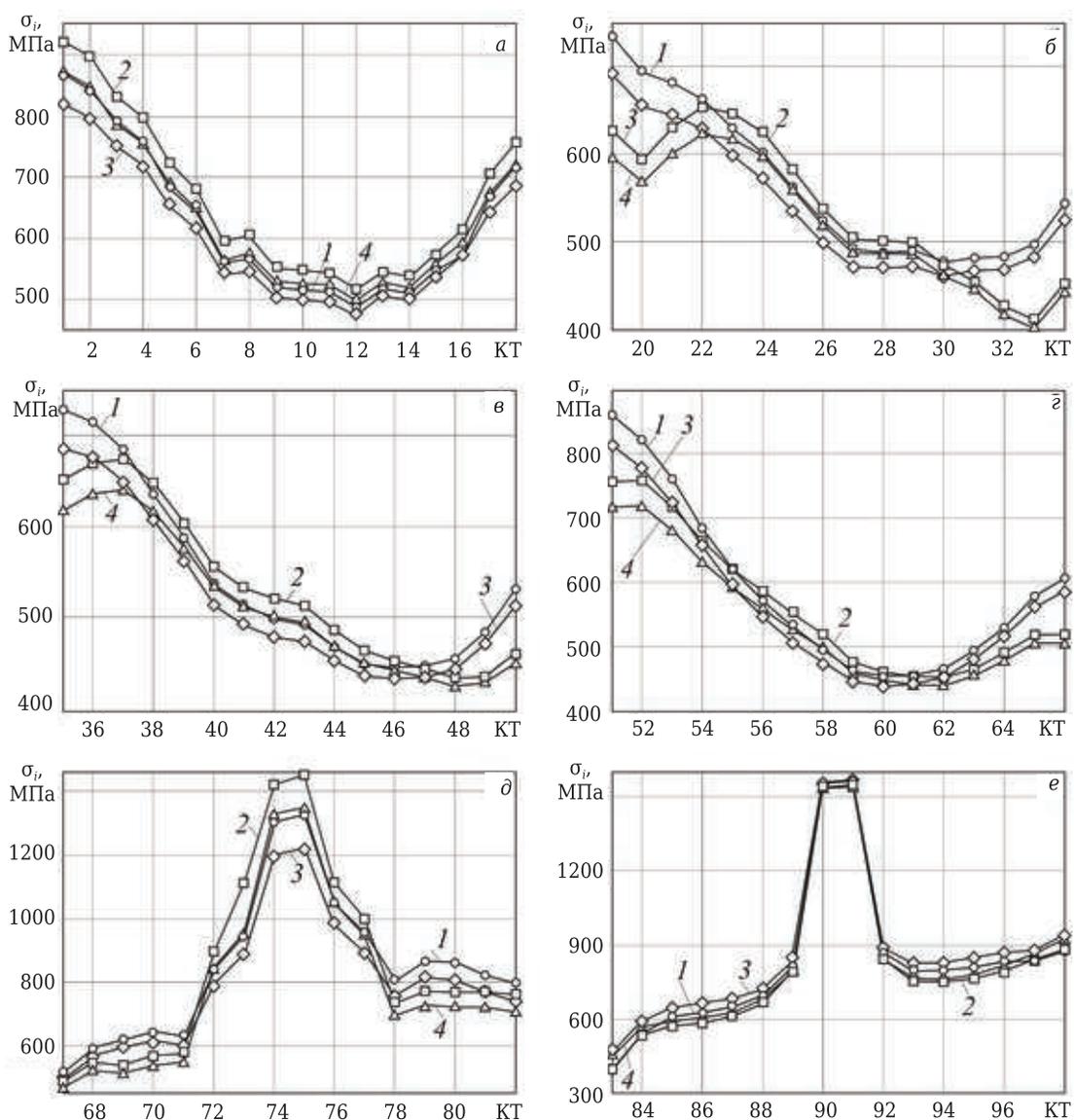


Рис. 3. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) керамики с покрытием систем № 1-4 (1-4) под действием силовой нагрузки

Кривые изменения σ_i в КТ поверхности С1 ПС керамики с покрытием систем № 1–4 показаны на рис. 3, а. Видно, что они имеют два характерных участка. На участке КТ1–КТ12 σ_i уменьшаются, а на участке КТ12–КТ18 увеличиваются. Установлено, что в поверхности С1 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 488 ($\sigma_{\text{мин}}$) до 869 МПа ($\sigma_{\text{макс}}$) при $\Delta\sigma_i = 381$ МПа и $M_e = 568$ МПа, системы № 2 — от 516 до 921 МПа при $\Delta\sigma_i = 405$ МПа и $M_e = 606,5$ МПа, системы № 3 — от 471 до 816 МПа при $\Delta\sigma_i = 345$ МПа и $M_e = 555$ МПа, системы № 4 — от 499 до 872 МПа при $\Delta\sigma_i = 373$ МПа и $M_e = 585$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 2, наименьшими — система № 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С2 ПС керамики с покрытием систем № 1–4 показан на рис. 3, б. Видно, что на графике имеются две пары однотипных кривых сглаженной формы: первая для систем № 1, 3, вторая для систем № 2, 4. Особенность кривых для систем № 1, 3 — наибольшая σ_i в КТ19 и наименьшая в КТ30, а для систем № 2, 4 — наибольшая σ_i в КТ22 и наименьшая в КТ33. В поверхности С2 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 477 до 732 МПа при $\Delta\sigma_i = 255$ МПа и $M_e = 534$ МПа, системы № 2 — от 413 до 655 МПа при $\Delta\sigma_i = 242$ МПа и $M_e = 523$ МПа, системы № 3 — от 462 до 691 МПа при $\Delta\sigma_i = 229$ МПа и $M_e = 513$ МПа, системы № 4 — от 403 до 623 МПа при $\Delta\sigma_i = 220$ МПа и $M_e = 503$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 ПС керамики с покрытием четырех систем показан на рис. 3, в. Для кривых систем № 1, 3 наибольшая σ_i зафиксирована в КТ35, наименьшая — в КТ46; для систем № 2, 4 наибольшая σ_i — в КТ37, наименьшая — в КТ48. В поверхности С3 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 448 до 728 МПа при $\Delta\sigma_i = 280$ МПа и $M_e = 508$ МПа, системы № 2 — от 436 до 676 МПа при $\Delta\sigma_i = 240$ МПа и $M_e = 519,5$ МПа, системы № 3 — от 435 до 686 МПа при $\Delta\sigma_i = 251$ МПа и $M_e = 486,5$ МПа, системы № 4 — от 427 до 641 МПа при $\Delta\sigma_i = 214$ МПа и $M_e = 499,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 2, наименьшими — системы № 4 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 ПС керамики с покрытием систем № 1–4 показан на рис. 3, г. Наибольшая σ_i для систем № 1, 3 и 2, 4 зафиксирована в КТ51 и КТ52, наименьшая σ_i для систем № 1, 3 и 2, 4 — в КТ60 и КТ62 соответственно. В поверхности С4 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 453 до 861 МПа при $\Delta\sigma_i = 408$ МПа и $M_e = 551$ МПа, системы № 2 — от 452 до 759 МПа при $\Delta\sigma_i = 307$ МПа и $M_e = 519,5$ МПа, системы № 3 — от 437 до 813 МПа при $\Delta\sigma_i = 376$ МПа и $M_e = 531$ МПа, системы № 4 — от 439 до 719 МПа при $\Delta\sigma_i = 280$ МПа и

$M_e = 505,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 ПС керамики с покрытием систем № 1–4 показан на рис. 3, д. Видно, что кривые имеют одинаковую форму, причем на центральном участке значения σ_i сначала резко увеличиваются до максимальных значений в КТ74–КТ75, а затем уменьшаются, что свидетельствует о формировании структурных концентраторов напряжений. На периферийных участках (КТ67–КТ71 и КТ78–КТ82) σ_i имеют достаточно стабильные значения. Установлено, что в поверхности С5 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 512 до 1323 МПа при $\Delta\sigma_i = 811$ МПа и $M_e = 831,5$ МПа, в системе № 2 — от 482 до 1447 МПа при $\Delta\sigma_i = 965$ МПа и $M_e = 763,5$ МПа, в системе № 3 — от 499 до 1222 МПа при $\Delta\sigma_i = 723$ МПа и $M_e = 786$ МПа, в системе № 4 — от 469 до 1349 МПа при $\Delta\sigma_i = 880$ МПа и $M_e = 721,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 2 и 1, наименьшими — системы № 3 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 ПС керамики с покрытием четырех систем показан на рис. 3, е. Видно, что кривые однотипной формы свидетельствуют об образовании наибольшей σ_i на их центральном участке в КТ90 и КТ91, что также свидетельствует о формировании структурных концентраторов напряжений. В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 399 до 1570 МПа при $\Delta\sigma_i = 1171$ МПа и $M_e = 810,5$ МПа, системы № 2 — от 393 до 1544 МПа при $\Delta\sigma_i = 1151$ МПа и $M_e = 761$ МПа, системы № 3 — от 466 до 1572 МПа при $\Delta\sigma_i = 1106$ МПа и $M_e = 834,5$ МПа, системы № 4 — от 454 до 1545 МПа при $\Delta\sigma_i = 1091$ МПа и $M_e = 781,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 3, наименьшими — системы № 4 и 2.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхности С1–С6 ПС керамики с покрытием систем № 1–4 под действием сосредоточенной и распределенной сил показаны на рис. 4. 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 с покрытием системы № 1 показано на рис. 4, а. Установлено, что в поверхности С1 $\sigma_{\text{ср}} = 627,1$ МПа при $s = 123,8$, в поверхности С2 $\sigma_{\text{ср}} = 564,9$ МПа при $s = 88,5$, в поверхности С3 $\sigma_{\text{ср}} = 543,9$ МПа при $s = 97,3$, в поверхности С4 $\sigma_{\text{ср}} = 587,1$ МПа при $s = 131,9$, в поверхности С5 $\sigma_{\text{ср}} = 845,7$ МПа при $s = 233,8$, в поверхности С6 $\sigma_{\text{ср}} = 834,9$ МПа при $s = 314,9$. Наибольшими значениями $\sigma_{\text{ср}}$ и s в системе № 1 характеризуются поверхности С5 и С6, наименьшими — поверхности С3 и С2 соответственно.

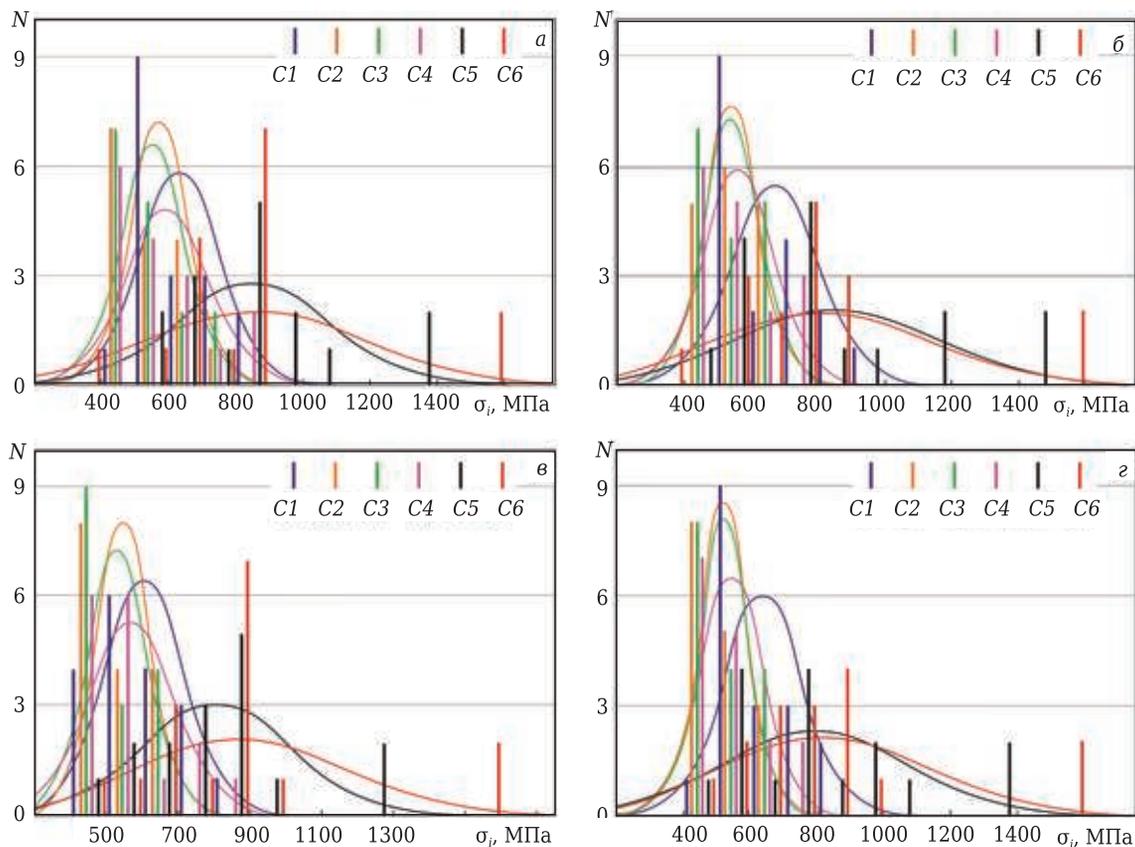


Рис. 4. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 (а–г) под действием силовой нагрузки

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики с покрытием системы № 2 показано на рис. 4, б. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{cp} = 662,3$ МПа при $s = 131,3$, в поверхности C2 $\sigma_{cp} = 540,6$ МПа при $s = 83,3$, в поверхности C3 $\sigma_{cp} = 536,8$ МПа при $s = 88,2$, в поверхности C4 $\sigma_{cp} = 563,6$ МПа при $s = 108,6$, в поверхности C5 $\sigma_{cp} = 839,1$ МПа при $s = 303,5$, в поверхности C6 $\sigma_{cp} = 802,8$ МПа при $s = 316,8$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 2 характеризуются поверхности C5 и C6, наименьшими — поверхности C3 и C2.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики с покрытием системы № 3 показано на рис. 4, в. Установлено, что в поверхности C1 σ_{cp} составляет 600,1 МПа при $s = 111,7$, в поверхности C2 $\sigma_{cp} = 540,8$ МПа при $s = 79,4$, в поверхности C3 $\sigma_{cp} = 521,3$ МПа при $s = 87,7$, в поверхности C4 $\sigma_{cp} = 562,4$ МПа при $s = 121,1$, в поверхности C5 $\sigma_{cp} = 797,8$ МПа и $s = 208,4$, в поверхности C6 $\sigma_{cp} = 868,5$ МПа при $s = 300,4$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 3 характеризуется поверхность C6, наименьшими — поверхности C3 и C2.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики с покрытием системы № 4 показано на рис. 4, г. Установлено, что в поверхности C1 σ_{cp} составляет 634,7 МПа при $s = 120,2$, в поверхности C2 $\sigma_{cp} = 519,4$ МПа при $s = 75,0$,

в поверхности C3 $\sigma_{cp} = 515,6$ МПа при $s = 78,8$, в поверхности C4 $\sigma_{cp} = 540,8$ МПа при $s = 98,6$, в поверхности C5 $\sigma_{cp} = 789,7$ МПа при $s = 273,7$, в поверхности C6 $\sigma_{cp} = 827,7$ МПа при $s = 305,5$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 4 характеризуется поверхность C6, наименьшими — поверхности C3 и C2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием усовершенствованной методики компьютерной инженерии ПС керамики проведен силовой анализ напряженно-деформированного состояния ПС Al_2O_3 –TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN. Установлено, что под действием сосредоточенной силы и распределенной силовой нагрузки происходит локальное вдавливание покрытий AlN и TiN в керамику, причем наибольшие деформации и напряжения зафиксированы в точке приложения сосредоточенной силы.

Установлено влияние покрытий AlN и TiN на характер изменения σ_i в поверхностях C1–C6, формирующих ПС Al_2O_3 –TiC-керамики. Результаты моделирования показывают, что наиболее благоприятное напряженно-деформированное состояние под действием силовой нагрузки формируется в ПС керамики с покрытием системы № 4. Для этой системы фиксировали наименьшие значения показателей σ_{max} , $\Delta\sigma_i$, M_e , σ_{cp} и s

в поверхностях C2, C3, C4 и C6. В поверхностях C1 и C5 наименьшие значения аналогичных показателей зафиксированы в ПС керамики системы № 3. Наименее благоприятное напряженно-деформированное состояние ПС под действием силовой нагрузки создается в ПС керамики системы № 1, что подтверждается наибольшими значениями основных показателей σ_{\max} , $\Delta\sigma_i$, M_e , σ_{cp} и s в поверхностях C2, C3, C4 и C6. В поверхностях C1 и C5 наибольшие значения аналогич-

ных показателей отмечены у керамики системы № 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. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Al₂O₃-TiC ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.

Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al₂O₃-TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 63–68.

2. **Kuzin, V. V.** Features of Al₂O₃-TiC-ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.

Кузин, В. В. Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al₂O₃-TiC-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 5. — С. 63–67.

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. **Бахарев, В. П.** Основы проектирования и управления процессами финишной обработки керамических и композиционных материалов / В. П. Бахарев. — Иваново : Иван. гос. ун-т, 2009. — 240 с.

5. **Greil, Peter.** Generic principles of crack-healing ceramics / Peter Greil // J. Adv. Ceram. — 2012. — Vol. 1, № 4. — P. 249–267.

6. **Lee, S. K.** Crack-healing behaviour of mullite/SiC/Y₂O₃ composites and its application to the structural integrity of machined components / S. K. Lee, M. Ono, W. Nakao [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2005. — Vol. 25, № 15. — P. 3495–3502.

7. **Nakao, W.** Critical crack-healing condition for SiC whisker reinforced alumina under stress / W. Nakao, M. Ono, S. K. Lee [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2005. — Vol. 25, № 16. — P. 3649–3655.

8. **Ando, K.** Crack-healing behavior of structural ceramics under constant and cyclic stress at elevated temperature / K. Ando, K. Furusawa, K. Takahashi [et al.] // J. Ceram. Soc. Jpn. — 2002. — Vol. 110, № 1284. — P. 741–747.

9. **Ando, K.** Crackhealing behavior of Si₃N₄/SiC ceramics under cyclic stress and resultant fatigue strength at the healing temperature / K. Ando, K. Takahashi, S. Nakayama [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. — 2002. — Vol. 85, № 9. — P. 2268–2272.

10. **Kuzin, V. V.** Tooling for high-speed cutting / V. V. Kuzin, S. I. Dos'ko, V. F. Popov [et al.] // Russian Engineering Research. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.

Кузин, В. В. Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, М. Ю. Фёдоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 46–50.

11. **Grigoriev, S. N.** Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin // Glass and Ceramics. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.

Григорьев, С. Н. Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17–22.

12. **Abd El-Rahman, A. M.** Synthesis and annealing effects on the properties of nanostructured Ti-Al-V-N coatings deposited by plasma enhanced magnetron sputtering / A. M. Abd El-Rahman // Mater. Chem. Phys. — 2015. — Vol. 149. — P. 179–187.

13. **Metel, A.** Synthesis of aluminum nitride coatings assisted by fast argon atoms in a magnetron sputtering system with a separate input of argon and nitrogen / A. Metel, S. Grigoriev, M. Volosova [et al.] // Surface & Coatings Technology. — 2020. — Vol. 398. — Article № 126078.

14. **Суджанская, И. В.** Свойства AlN-покрытия, полученного вакуумно-дуговым методом на кремнии / И. В. Суджанская, Д. А. Колесников, В. М. Береснев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники». — 2011. — № 6 (76). — С. 145–148.

15. **Kuzin, V. V.** The stressed state of the boundary between ceramic and a coating under the effect of power loads / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 192–198.

Кузин, В. В. Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием силовых нагрузок / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 38–44.

16. **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.

17. **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 03.06.21

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