

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**,
к. т. н. **М. А. Волосова**

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

УДК 621.924.93:666.3

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Экспериментально исследовано влияние расположения заготовок из оксидной керамики в камере пескоструйной установки на морфологию обработанной поверхности. На основе результатов математического моделирования предложен механизм формирования морфологии поверхности керамической заготовки, учитывающий угол ее наклона относительно абразивной форсунки.

Ключевые слова: струйно-абразивная обработка, морфология, поверхностный слой, напряженное состояние, разрушение.

Высокие требования к состоянию поверхностного слоя керамических деталей способна обеспечить струйно-абразивная обработка (САО) [1]. Эффект множественных ударов абразивных частиц, обладающих высокой кинетической энергией, по поверхности заготовки приводит к снятию слоя материала и созданию специфической микрогеометрии [2]. Однако технологические возможности САО керамических деталей ограничены из-за отсутствия рекомендаций по выбору режимов этого технологического процесса [3]. Цель работы — исследование влияния расположения заготовок из оксидной керамики в камере пескоструйной установки на морфологию обработанной поверхности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования выполнены с использованием пескоструйной установки Sandmaster 75IN, в рабочей камере которой закрепляли заготовки под углами 0 и 30 град к вертикально расположенной абразивной форсунке (АФ). Заготовки из оксидной керамики ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$) размером $50 \times 50 \times 10$ мм обрабатывали при режиме: давление воздуха $P = 2$ атм, расстояние от АФ до центральной области обрабатываемой поверхности $L = 100$ мм, время обработки $\tau = 10$ с, абразив — гранатовый песок с размером частиц 100–200 мкм. Морфологию обработанных поверхностей керамических заготовок изучали на сканирующем электронном

микроскопе Tescan Vega 3LMH и профилометре Hommel Tester T8000.

Теоретические исследования выполнены в автоматизированной системе термпрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [4] с использованием расчетной схемы, состоящей из элементов структуры керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ — зерно сферической формы диаметром $d = 10$ мкм из Al_2O_3 несимметрично введено в матрицу из Al_2O_3 через межзерненную фазу толщиной $\delta_f = 0,2$ мкм из MgO (рис. 1) [5]. К свободной по-

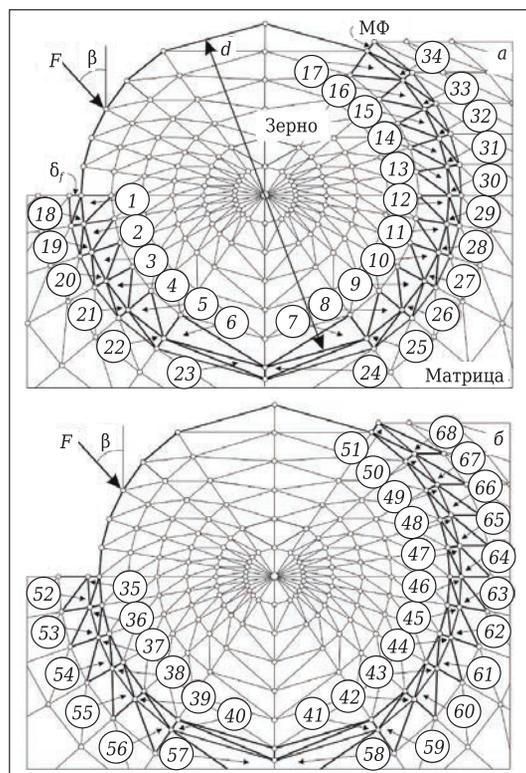


Рис. 1. Расчетная схема и выделенные КТ

✉
В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

верхности зерна прикладывали сосредоточенную силу $F = 0,002$ Н под углами β , равными 0 и 30 град, что имитировало контакт абразивной частицы с поверхностью керамики. Использовали метод контрольных точек (КТ) [6]. Выбранные КТ были расположены в поверхностях зерна (КТ1–КТ17), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (КТ18–КТ34) (см. рис. 1, а), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (КТ35–КТ51), и матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (КТ52–КТ68) (см. рис. 1, б). В этих КТ рассчитывали и анализировали интенсивность напряжений σ .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что после САО изменяется морфология поверхности предварительно шлифованных керамических заготовок. Направленный морфологический рисунок с многочисленными трещинами и областями разрушений, характерный для шлифованной поверхности, трансформируется в шагреновый рисунок, образованный хаотично расположенными лунками-кратерами и выступами со сглаженными кромками. Морфология поверхности оксидной керамики наиболее значительно изменяется в первые секунды обработки за счет удаления грубых неровностей исходной поверхности обработки. Интенсивность снятия слоев материала на этом этапе зависит от многих факторов, в том числе от расположения (угла наклона) заготовки относительно АФ в камере пескоструйной установки. Выявлено, что увеличение угла наклона заготовки уменьшает интенсивность снятия слоев материала с поверхности оксидной керамики.

На втором этапе обработки (5–10 с) поверхность керамики приобретает окончательный морфологический рисунок, на который также значительно влияет угол наклона заготовки. В качестве примера на рис. 2 показаны микрофотографии центральных областей поверхностей керамических заготовок, установленных под разными углами наклона к АФ. Видно, что поверхность заготовки, расположенной нормально к АФ ($\beta = 0^\circ$), имеет более рельефный вид (см. рис. 2, а), чем поверхность заготовки, поверну-

той на угол $\beta = 30^\circ$ (см. рис. 2, б). Внешним проявлением влияния угла воздействия являются форма и размеры среднестатистического кратера, образующегося при контакте единичной высокоэнергетической абразивной частицы с поверхностью керамики. Несмотря на разную морфологию этих поверхностей, на них не обнаружены локальные разрушения и трещины.

Развитый рельеф обработанным поверхностям заготовок, установленных нормально к АФ, придает многочисленные глубокие лунки-кратеры, размеры которых совпадают со средним размером зерен в исходной керамике (10 мкм). Боковые поверхности кратеров образованы границами соседних зерен, что свидетельствует о хрупком разрушении отдельных зерен по межкристаллитному механизму. Между глубокими лунками-кратерами расположены участки с традиционной для керамической поверхности после САО морфологией — мелкими кратерами и невысокими выступами, образовавшимися в результате микрорезания и пластического течения тонкого поверхностного слоя керамики в направлении перемещения абразивных частиц по обрабатываемой поверхности. Наибольшее число глубоких кратеров зафиксировано в локальной области, расположенной по оси АФ, а по мере удаления исследуемых участков от этой области к периферии образцов частота появления этих специфических элементов морфологического рисунка заметно уменьшается.

На обработанных поверхностях заготовок, установленных под углом $\beta = 30^\circ$, специфических элементов морфологического рисунка не обнаружено. Наиболее глубокие и редко встречаемые кратеры со сглаженными наружными гранями имеют размер 5–7 мкм, что соответствует среднему размеру пор в структуре исходной оксидной керамики. При угле воздействия $\beta = 30^\circ$ абразивные частицы, проскальзывая по обрабатываемой поверхности, создают кратеры вытянутой (продолговатой) формы, на выходной части которых имеются выступы, что свидетельствует о преобладающей роли транскристаллитного разрушения керамики при обработке заготовки, установленной под углом к АФ.

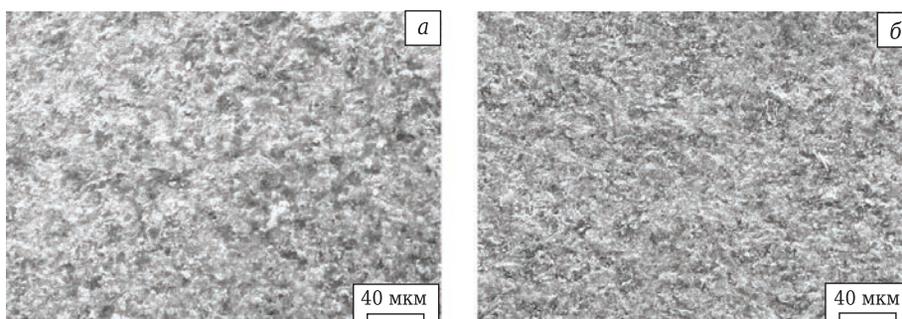


Рис. 2. Морфология поверхности оксидной керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ при расположении заготовок под углом 0 (а) и 30 (б) град к форсунке пескоструйной установки

Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя образцов из керамики системы Al_2O_3 - MgO - Al_2O_3 под действием F , приложенной под разными углами к поверхности, позволило выявить причину существенного влияния угла наклона образцов по отношению к форсунке на форму кратеров. Поля упругих деформаций, сформировавшиеся в поверхностном слое керамики, имеют хорошо различимые границы, в пределах которых все КТ перемещаются во внутренний объем керамики. Значения горизонтальных и вертикальных перемещений КТ под действием F зависят от угла приложения этой силы и расположения КТ. Наибольшие перемещения имеют крайние КТ во всех структурных элементах керамики под действием F , приложенной под углом $\beta = 0^\circ$.

Угол приложения F оказывает существенное влияние на характер распределения σ_i в КТ всех структурных элементов — при $\beta = 0^\circ$ в крайних КТ формируются экстремально высокие напряжения, более чем в два раза превышающие напряжения в тех же КТ при $\beta = 30^\circ$ (рис. 3). Напряженное состояние в поверхностном слое при $\beta = 30^\circ$ является более стабильным, чем при $\beta = 0^\circ$.

Установлено, что в КТ зерна керамики системы Al_2O_3 - MgO - Al_2O_3 под действием $F = 0,002$ Н, приложенной под углом $\beta = 0^\circ$, σ_i изменяется в диапазоне 741 МПа — от 876 (КТ1) до 135 МПа (КТ6) (см. рис. 3, а), а при $\beta = 30^\circ$ в диапазоне 134 МПа — от 460 (КТ1) до 326 МПа (КТ7). В КТ межзеренной фазы, примыкающих к зерну (см. рис. 3, б), σ_i при $\beta = 0^\circ$ изменяется в диапазоне 971 МПа — от 1064 (КТ18) до 93 МПа (КТ23), а при $\beta = 30^\circ$ в диапазоне 199 МПа — от 477 (КТ34) до 218 МПа (КТ20). В КТ межзеренной фазы, примыкающих к матрице (см. рис. 3, в), σ_i при $\beta = 0^\circ$ изменяется в диапазоне 1331 МПа — от 1483 (КТ35) до 152 МПа (КТ40), а при $\beta = 30^\circ$ в диапа-

зоне 374 МПа — от 626 (КТ35) до 252 МПа (КТ38). В КТ матрицы (см. рис. 3, г) σ_i при $\beta = 0^\circ$ изменяется в диапазоне 524 МПа — от 592 (КТ52) до 68 МПа (КТ57), а при $\beta = 30^\circ$ в диапазоне 202 МПа — от 343 (КТ68) до 141 МПа (КТ54).

Результаты численных экспериментов показывают, что напряженно-деформированное состояние поверхностной структурных элементов оксидной керамики под действием F , приложенной под углом $\beta = 0^\circ$, характеризуется более высокой неоднородностью, чем под углом $\beta = 30^\circ$. Наибольший диапазон изменения σ_i (1331 МПа) зафиксирован в межзеренной фазе, примыкающей к матрице, под действием сосредоточенной силы $F = 0,002$ Н, приложенной под углом $\beta = 0^\circ$. Диапазон изменения σ_i в КТ зерна при угле $\beta = 0^\circ$ действия F в 5,52 раза выше, чем при $\beta = 30^\circ$; в КТ межзеренной фазы, примыкающих к зерну, при угле $\beta = 0^\circ$ в 5,34 раза выше, чем при $\beta = 30^\circ$; в КТ межзеренной фазы, примыкающих к матрице, при угле $\beta = 0^\circ$ в 3,55 раза выше, чем при $\beta = 30^\circ$; в КТ матрицы при угле $\beta = 0^\circ$ в 2,59 раза выше, чем при $\beta = 30^\circ$.

Эффект формирования экстремально высоких напряжений в межзеренной фазе, примыкающей к матрице, может находиться в основе механизма формирования глубоких кратеров на поверхности керамических образцов, расположенных нормально к форсунке. Эти напряжения могут приводить к образованию многочисленных трещин на границе соседних зерен, рост которых приводит к разрушению поверхностного слоя керамики по межкристаллитному механизму с образованием глубоких кратеров. В случае наклонного расположения керамических образцов относительно форсунки в их поверхностном слое формируется достаточно стабильное напряженное состояние, в результате чего разрушение керамики происходит по механизму

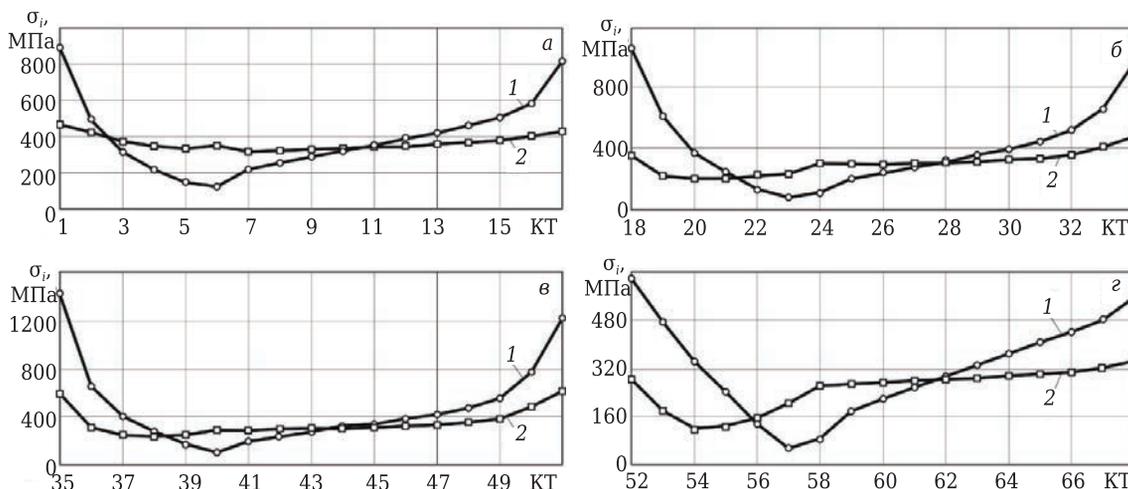


Рис. 3. Интенсивность напряжений σ_i в КТ зерна (а), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (б), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (в), и матрицы (г) керамики системы Al_2O_3 - MgO - Al_2O_3 под действием $F = 0,002$ Н, приложенной под углами $\beta = 0^\circ$ (1) и $\beta = 30^\circ$ (2)

транскристаллитного разрушения без образования глубоких кратеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что расположение (угол наклона) заготовки оксидной керамики относительно АФ в камере пескоструйной установки оказывает значительное влияние на интенсивность снятия слоев материала и морфологию обработанной поверхности при САО. Поверхность заготовки, расположенная нормально к АФ, имеет более рельефный вид по сравнению

с поверхностью заготовки, наклоненной относительно АФ. Внешним проявлением влияния угла воздействия на морфологию обработанной поверхности являются форма и размеры среднестатистического кратера, образующегося при контакте единичной абразивной частицы с поверхностью керамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 9.1372.2017/4.6.

Библиографический список

1. **Кузин, В. В.** Влияние воздушно-абразивной обработки на эксплуатационные характеристики изделий из оксидно-карбидной керамики / В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров, В. И. Мороз // Новые огнеупоры. — 2015. — № 9. — С. 62–67.

Kuzin, V. V. Effect of air-abrasive treatment on oxide-carbide ceramic object operating properties / V. V. Kuzin, N. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov, V. I. Moroz // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 5, — P. 517–521.

2. **Исупов, М. Г.** К теории струйно-абразивной обработки / М. Г. Исупов // Вестник машиностроения. — 2005. — № 3. — С. 58–62.

3. **Кузин, В. В.** Инструменты с керамическими режущими пластинами / В. В. Кузин. — М.: Янус-К, 2006. — 160 с.

4. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочрезности 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.

5. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 2. Действует сосредоточенная сила / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 77–82.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coatings on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 2. Concentrated force action / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 487–491.

6. **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 26.11.18

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2018 г.

Поправки к статьям В. В. Кузина и др., опубликованным в журнале «Новые огнеупоры» за 2018 г.

► В № 1 (с. 67), № 3 (с. 68) и № 8 (с. 59) в правой колонке после заключения следует читать: «Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 9.1372.2017/4.6».

► В № 2 (с. 68, правая колонка) и № 5 (с. 68) после заключения вместо «Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908)» следует читать: «Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 9.1372.2017/4.6».