

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **С. Ю. Фёдоров**

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

УДК 666.3:546.623-31

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ Al_2O_3 -КЕРАМИКИ С МЕХАНИЗМОМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАГОТОВОК ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Установлена взаимосвязь структуры Al_2O_3 -керамики с шероховатостью и морфологией шлифованной поверхности образцов. На этой основе вскрыта физическая природа формирования поверхностного слоя при алмазном шлифовании мелкозернистой и крупнозернистой керамики.

Ключевые слова: шлифование, Al_2O_3 -керамика, структура, морфология, шероховатость, поверхностный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Вывявление физической природы процессов, протекающих в поверхностном слое керамических заготовок при алмазной обработке, традиционно является актуальным направлением прикладных исследований [1–3]. Это объясняется необходимостью создания высокопроизводительной технологии изготовления прецизионных керамических изделий для перспективных областей применения [4–6]. Результаты многочисленных публикаций по этому научному направлению доказывают, что процесс формирования их поверхностного слоя определяется состоянием подсистемы «контакт шлифовального круга с поверхностью керамической заготовки» в технологической системе [7–11]. При этом свойства и структура керамики, занимая особую позицию в этой подсистеме, определяют эффективность функционирования всей технологической системы [12, 13].

Взаимосвязь свойств керамики с точностью изготовленных изделий и качеством их поверхностного слоя в настоящее время достаточно изучена [14–18]. На этой основе созданы технологические рекомендации по выбору оптимальных характеристик алмазных кругов и назначению рациональных режимов шлифования заготовок из разных керамических материалов [19–21]. Однако влияние структуры керамики на качество изготовленных изделий исследовано не столь детально, что не позволяет учитывать эту важнейшую характеристику обрабатываемого ма-

териала при проектировании технологических процессов алмазной обработки.

Цель настоящей работы — изучение влияния структуры Al_2O_3 -керамики на механизм формирования поверхностного слоя заготовок при алмазном шлифовании для уточнения технологических рекомендаций по проектированию процесса алмазной обработки прецизионных керамических изделий.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовали две партии образцов (по 6 шт. в каждой), изготовленных по технологии искрового плазменного спекания из высокочистого порошка $\alpha-Al_2O_3$ с размером частиц до 10 мкм (80 об. %, остальное — частицы размерами до 5 мкм) без использования активаторов спекания. Для получения образцов с разной структурой использовали рекомендации, указанные в статье [22]. Первоначально на трех спеченных образцах из каждой партии изучили структуру керамики на изломах, полученных методом однократного ударного воздействия. Затем три других образца из каждой партии шлифовали на плоскошлифовальном станке ОПШ-440 в многоместном приспособлении при следующем режиме: скорость круга $v_{кр} = 30$ м/с, продольная подача $S_{пр} = 10$ м/мин, поперечная подача $S_{поп} = 1$ мм/ход, глубина шлифования $t = 0,03$ мм. Использовали алмазный круг 1A1B2-01 100% AC6 160/125 и смазочно-охлаждающую жидкость. После шлифования образцы подвергали ультразвуковой мойке в установке Elmasonic S70. На последнем этапе изучали шероховатость и морфологию шлифованных поверхностей.

В исследовании использовали профилограф Hommel Tester T8000, сканирующий электронный микроскоп VEGA3 LMN и установку катод-



В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

ного распыления Quorum Q150R ES, на которой наносили токопроводящую пленку углерода на поверхность керамики. Шероховатость Ra измеряли в продольном (вдоль продольной подачи при шлифовании) и поперечном (вдоль поперечной подачи при шлифовании) направлениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования изломов образцов, спеченных на разных режимах, выделены две специфические структуры Al_2O_3 -керамики, различающиеся размером зерен и пористостью. Микрофотографии мелкозернистой и крупнозернистой структуры керамики показаны на рис. 1. Видно, что мелкозернистую структуру Al_2O_3 -керамики образуют зерна сглаженной формы средним размером 3 мкм (до 90 % объема). Эти зерна хаотично контактируют между собой с образованием перемычек, средняя длина которых не превышает 1 мкм (см. рис. 1, а). В этой структуре имеются также зерна вытянутой формы с заостренными гранями и размерами 5–6 мкм, число которых не превышает 10 % объема. Пористость мелкозернистой керамики 12–15 %; многочисленные поры размерами до 0,5 мкм располагаются на стыках зерен.

Крупнозернистая структура Al_2O_3 -керамики сформирована плотноупакованными многогранными зернами размерами 10–25 мкм и отдель-

ными аномально крупными зернами вытянутой формы размерами до 60 мкм (см. рис. 1, б). Структура керамики имеет упорядоченный вид — крупные зерна окружены зернами меньшего размера, причем их границы являются практически бездефектными (за исключением незначительных граничных пор диаметром до 0,5 мкм). Во внутреннем объеме крупных зерен имеются единичные округлые поры диаметром до 3 мкм. Пористость крупнозернистой керамики 2–3 %.

В результате измерения шероховатости шлифованных поверхностей керамических образцов выявлена обратная зависимость между параметром Ra и зернистостью исходной керамики. Наименьшее значение Ra зафиксировано на образцах с крупнозернистой структурой; значения Ra составляли 0,9 и 1,1 мкм в продольном и поперечном направлениях соответственно. Значения Ra для образцов с мелкозернистой структурой составляли 1,8 мкм в продольном и поперечном направлениях.

Микрофотографии поверхностей образцов Al_2O_3 -керамики с мелкозернистой и крупнозернистой структурой после шлифования показаны на рис. 2. Видно, что в результате контактного взаимодействия алмазного шлифовального круга с поверхностью керамики происходит снятие припуска с заготовки с образованием поверхностей, имеющих оригинальный морфологический рисунок. Каждый морфологический рисунок характеризуется специфическими особенностями, определяемыми исходной структурой Al_2O_3 -керамики. Проанализируем характерные особенности морфологии шлифованной поверхности керамики с разной структурой.

Морфология шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики с мелкозернистой структурой практически повторяет ее исходную структуру при наличии двух отличительных признаков. Первый признак заключается в присутствии многочисленных плоских площадок 1 (см. рис. 2, а), хаотично распределенных на шлифованной поверхности образцов. Эти изолированные друг от друга плоские площадки размерами до 5 мкм образовались на наиболее выступающих вершинах зерен Al_2O_3 в результате их контакта с алмазным кругом при шлифовании. На наиболее крупных площадках заметны риски от единичных алмазных зерен, на мелких площадках эти риски отсутствуют. Второй отличительный признак заключается в увеличенном числе (до 5 раз) многогранных

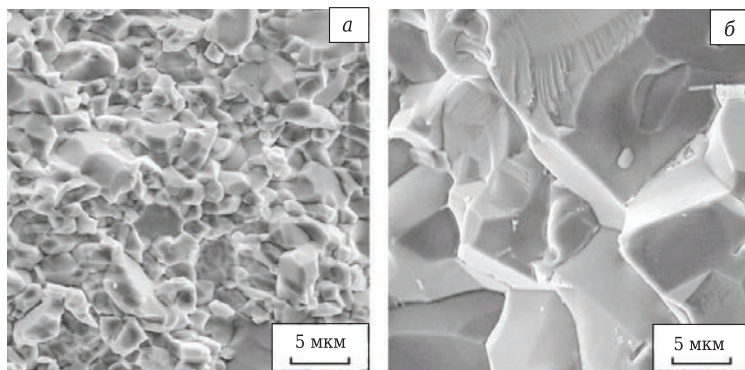


Рис. 1. Мелкозернистая (а) и крупнозернистая (б) структура Al_2O_3 -керамики

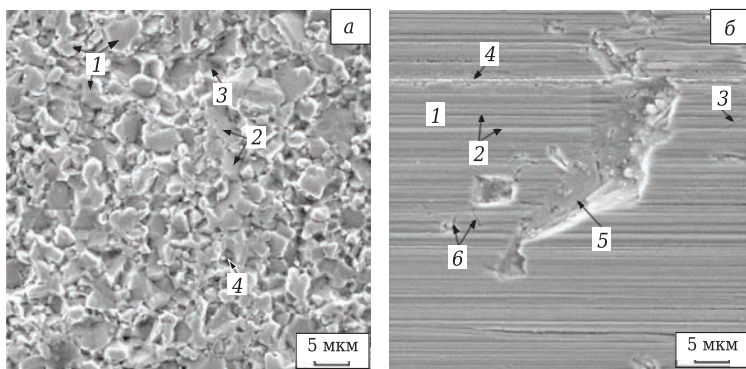


Рис. 2. Морфология шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики с мелкозернистой (а) и крупнозернистой структурой (б)

углублений 2 между плоскими площадками. Эти углубления разных размеров образованы гранями соседних зерен Al_2O_3 , причем многие грани имеют характерные признаки сколов, произошедших при шлифовании. Кроме того, на поверхности имеются совокупности 3 углублений, связанных между собой и имеющих общую длину более 15 мкм, что свидетельствует о вырывах конгломератов мелких зерен из керамического каркаса при шлифовании. Увеличивают шероховатость шлифованной поверхности многочисленные округлые поры 4 диаметром до 1 мкм, число которых увеличилось в 2 раза по сравнению с исходной структурой из-за «вскрытия» подповерхностных пустот в керамике, образовавшихся при спекании. На основании анализа морфологии шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики с мелкозернистой структурой можно заключить, что снятие припуска и формирование поверхностного слоя происходят в результате межкристаллитного разрушения поверхностного слоя керамики. Пластическая деформация в этом процессе играет минимальную роль.

Морфология шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики с крупнозернистой структурой принципиально отличается от исходной структуры керамики (см. рис. 2, б). Шлифованная поверхность имеет четко выраженный направленный рисунок, связанный с направлением подачи при шлифовании. Сглаженный морфологический рисунок этой поверхности создает слой 1 пластически деформированной керамики толщиной до 0,5 мкм. Этот слой характеризуется высокой дефектностью, которую формируют многочисленные риски 2 шириной до 1,5 мкм (ориентированные по направлению продольной подачи), трещины 3, области локального разрушения 4 и углубления 5 неправильной формы. Размеры этих углублений изменяются в широком диапазоне и достигают длины 40 мкм. Природа их происхождения связана с остроугольными поверхностными порами, образованными гранями крупных поверхностных зерен. На отдельных участках шлифованной поверхности присутствуют видимые следы 6 межзеренных границ. На основании проведенного анализа морфологии шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики с крупнозернистой структурой установлено, что в этом случае снятие припуска с заготовки идет по механизму

транскристаллитного разрушения, а формирование поверхностного слоя происходит за счет интенсивной пластической деформации в слое толщиной не более 0,5 мкм.

Выявленная физическая природа формирования поверхностного слоя при шлифовании образцов, имеющих мелкозернистую (пористость 12–15 %) и крупнозернистую (пористость 2–3 %) структуру, позволила объяснить физику обратной зависимости между параметром Ra шлифованной поверхности и зернистостью исходной Al_2O_3 -керамики. Этот эффект связан с тем, что на шероховатость шлифованной поверхности большее влияние оказывает пластическая деформация в тонком поверхностном слое керамики, чем ее зернистость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, выполненных с использованием оригинальной методики, выявлена взаимосвязь структуры Al_2O_3 -керамики с шероховатостью и морфологией шлифованной поверхности образцов. Установлено, что значения Ra для крупнозернистой керамики составляли 0,9 и 1,1 мкм в продольном и поперечном направлениях соответственно, а для мелкозернистой керамики — 1,8 мкм в обоих направлениях. На основании анализа морфологии шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики с разной структурой вскрыта физическая природа формирования их поверхностного слоя. Для мелкозернистой керамики приоритетным механизмом является межкристаллитное разрушение поверхностного слоя керамики, а пластическая деформация в этом процессе играет минимальную роль. Для крупнозернистой керамики снятие припуска с заготовки происходит по механизму транскристаллитного разрушения, а поверхностный слой формируется за счет интенсивной пластической деформации в слое толщиной до 0,5 мкм. На основе выявленных взаимосвязей внесены уточнения в технологические рекомендации по проектированию процесса алмазного шлифования прецизионных керамических изделий.

* * *

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.

Библиографический список

1. **Kitajima, K.** Study on mechanism of ceramics grinding / K. Kitajima, G. O. Cai, N. Kurnagai [et al.] // An. of the CIRP. — 1992. — Vol. 14. — P. 367–371.
2. **Шкарупа, И. Л.** Механическая обработка керамических материалов на основе оксида алюминия, нитрида и карбида кремния / И. Л. Шкарупа, Д. А. Климов // Стекло и керамика. — 2004. — № 6. — С. 16–18.
3. **Tanovic, L.** Mechanisms in oxide-carbide ceramic BOK60 grinding / L. Tanovic, P. Bojanic, M. Popovic // Int. J. Adv. Manufacturing Technol. — 2011. — Vol. 58. — P. 9–12.
4. **Ling, Y.** High speed versus conventional grinding in high removal rate machining of alumina and alumina-titania / Y. Ling, H. Huang, K. Ramesh, T. Huang // Int. J. Machine Tools and Manufacture. — 2005. — Vol. 45. — P. 897–907.

5. Кузин, В. В. Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на основе нитрида кремния / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2006. — № 8. — С. 19–24.

Kuzin, V. V. Technology for machining high-refractory ceramic parts based on silicon nitride / V. V. Kuzin // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2006. — Vol. 47, № 4. — P. 204–208.

6. Huang, H. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding / H. Huang, Y. C. Liu // *Machine Tools & Manufacture*. — 2003. — Vol. 43. — P. 811–823.

7. Кузин, В. В. Влияние режимов алмазного шлифования на триботехнические характеристики керамики на основе оксида алюминия / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, А. Е. Селезнев // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 475–481.

Kuzin, V. V. Effect of conditions of diamond grinding on tribological behavior of alumina-based ceramics / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, A. E. Seleznev // *Journal of Friction and Wear*. — 2016. — Vol. 37, № 4. — P. 371–376.

8. Jianyi, C. Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramics with brazed diamond wheels / C. Jianyi, S. Jianyun, H. Hui, X. Xipeng // *J. Mater. Process. Technol.* — 2010. — Vol. 210. — P. 899–906.

9. Кузин, В. В. Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2003. — № 12. — С. 41–45.

Kuzin, V. V. Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / V. V. Kuzin // *Russian Engineering Research*. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 32–36.

10. Matsuo, T. High-precision surface grinding of ceramics with superfine grain diamond cup wheels / T. Matsuo, M. Touge, H. Yamada // *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. — 1997. — Vol. 46. — P. 249–252.

11. Kuzin, V. A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / V. Kuzin // *Key Eng. Mater. Precision Machining*. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.

12. Xie, Zong-Han. Role of microstructure in the grinding and polishing of α -sialon ceramics / Zong-Han Xie, Robert J. Moon, Mark Hoffman [et al.] // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 2003. — Vol. 23. — P. 2351–2360.

13. Liu, Wei. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding / Wei Liu, Zhaohui Deng, Yuanyuan Shang [et al.] // *Ceram. Int.* — 2017. — Vol. 43, Part B. — P. 1571–1577.

14. Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al_2O_3 -керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 7. — С. 65–70.

Kuzin, V. V. Roughness of high hardness ceramic correlation of diamond grinding regimes with Al_2O_3 -ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 388–393.

15. Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 63–68.

Kuzin, V. V. Correlation of diamond grinding regimes with Al_2O_3 -TiC-ceramic surface condition / V. V. Kuzin,

S. Yu. Fedorov // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.

16. Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности керамики на основе диоксида циркония / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2016. — № 11. — С. 60–65.

Kuzin, V. V. Correlation of diamond grinding regime with surface condition of ceramic based on zirconium dioxide / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2017. — Vol. 57, № 6. — P. 625–630.

17. Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Si_3N_4 -керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 67–70.

Kuzin, V. V. Correlation of diamond grinding regimes with Si_3N_4 -ceramic surface quality / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 78–81.

18. Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности SiSiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 3. — С. 179–185.

Kuzin, V. V. Correlation of diamond grinding regimes with SiSiC-ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2017. — Vol. 58, № 2. — P. 214–219.

19. Кузин, В. В. Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al_2O_3 -TiC-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 5. — С. 63–67.

Kuzin, V. V. Features of Al_2O_3 -TiC-ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.

20. Кузин, В. В. Проектирование технологических процессов изготовления деталей из Si_3N_4 -керамики с учетом требуемой дефектности кромок / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 65–68.

Kuzin, V. V. Production process planning for preparing Si_3N_4 -ceramic objects taking account of edge defectiveness / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2018. — Vol. 58, № 5. — P. 562–565.

21. Кузин, В. В. Технологическое обеспечение качества кромок колец пары трения из карбида кремния для торцовых уплотнений насосов / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 11. — С. 65–69.

Kuzin, V. V. Technological provision of the quality of ring edges of silicon-carbide friction couples for the end seals of the pumps / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2018. — Vol. 58, № 6. — P. 647–651.

22. Кузин, В. В. Искровое плазменное спекание заготовок Al_2O_3 -керамики для мелкогабаритных концевых фрез / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2018. — № 11. — С. 64–68. ■

Получено 11.12.18
© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
С. Ю. Фёдоров, 2019 г.