

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

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

УДК 666.3:546.62-31+546.82'261]:532.526.75

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Установлено, что параметры режима шлифования образцов Al_2O_3 -TiC-керамики существенно влияют на их трибологические характеристики, причем интенсификация режима приводит к увеличению тангенциальной силы и коэффициента трения, ширины дорожки трения и ширины участка износа. С использованием выявленных взаимосвязей разработаны технологические рекомендации по нормированию качества керамических деталей на стадии их проектирования, повышающие эксплуатационную надежность керамических изделий.

Ключевые слова: Al_2O_3 -TiC-керамика, режим шлифования, морфология поверхности, трибологические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Поиску новых направлений в обеспечении эксплуатационной надежности керамических деталей в узлах трения и режущих инструментов уделяется большое внимание в теоретической и экспериментальной науке [1]. Важным ориентиром в этих исследованиях являются трибологические характеристики и износ рабочих поверхностей керамических деталей и инструментов [2–7]. Известно, что на процессы трения и износа значительно влияет морфология поверхностного слоя керамики с присущими ей многочисленными дефектами, образовавшимися при алмазном шлифовании [8–10]. Однако определить количественные показатели взаимосвязи качества шлифованной поверхности с трибологическими характеристиками керамических деталей не представляется возможным из-за многообразия морфологических рисунков и разнородности поверхностных дефектов, а также весьма сложной физической природы этой взаимосвязи [11, 12]. Однако решение этой задачи может быть найдено при исследовании связей в системе режим алмазного шлифования → состояние поверхности керамики → трибологические характеристики [13].

Цель работы — исследование влияния режимов алмазного шлифования на трибологические характеристики поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики для разработки технологических

рекомендаций по нормированию качества керамических деталей на стадии их проектирования, повышающих надежность трибоузлов и режущих инструментов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовали образцы размерами $20 \times 20 \times 5$ мм из Al_2O_3 -TiC-керамики, свойства которой приведены в статье [11]. Образцы шлифовали на станке ОШ-440 с использованием алмазного круга (1A1B2-01 100 % AC6 160/125) и смазочно-охлаждающей жидкости. Скорость круга во всех экспериментах оставалась постоянной ($v_{кр} = 30$ м/с), продольную подачу $S_{пр}$ изменяли в диапазоне от 5 до 15 м/мин, поперечную подачу $S_{поп}$ от 0,5 до 1,5 мм/ход, глубину шлифования t от 0,01 до 0,05 мм.

Испытания на трение проводили на трибометре BAZALT-2N при частоте вращения керамического образца $\omega = 50$ мин⁻¹, нормальной силе прижима контртела $F_n = 20$ Н и длине пути трения $L = 200$ м. В качестве контртела использовали шарик диаметром 6 мм из стали ШХ15 (HRC 63, класс точности 40). В этих экспериментах фиксировали тангенциальную силу F_t и коэффициент трения μ , ширину трека трения b в восьми симметрично расположенных точках с последующим определением среднего значения. Испытания на износостойкость проводили на лабораторном стенде, реализующем схему вращающийся диск – неподвижный керамический образец. Диск диаметром 80 и толщиной 2,8 мм был выполнен из стали 45 (HRC 50–52). Морфологию поверхности керамики, дорожек трения и участков износа анализировали с ис-



В. В. Кузин

E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

пользованием сканирующего электронного микроскопа VEGA3 LMH, а размеры дорожки и участка износа измеряли на оптическом микроскопе Stereo Discovery V12 (Zeiss).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что морфология шлифованной поверхности характеризуется совокупностью неровностей в виде впадин и выступов (рис. 1, а). На поверхности образцов имеется слой пластически деформированной керамики толщиной до 1,2 мкм [11]. Этот слой, сформировавшийся в результате воздействия высокой температуры в зоне контакта круга с поверхностью керамики и последующего быстрого охлаждения, имеет неоднородную структуру; во впадинах слой распределен достаточно равномерно, а на выступах имеет более развитый морфологический рисунок за-за присутствия мелких продольных рисок. На поверхности шлифованных образцов обнаружены многочисленные и хаотично расположенные дефекты, наиболее значимыми среди которых являются области локального разрушения с углублениями на их границах (рис. 1, б). Во впадинах имеются многочисленные трещины, а на поверхности выступов волнообразные наплывы и продольные риски.

Развитость рельефа шлифованной поверхности керамических образцов, число и размеры дефектов зависят от режима шлифования. Установлено, что интенсификация режима шлифования приводит к увеличению глубины впадин, высоты выступов, расстояния между впадинами (выступами), числа и размеров областей локального разрушения. Сформировавшийся при шлифовании морфологический рисунок существенно влияет на шероховатость Ra поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики [11]. Повышение $S_{пр}$ от 5 до 15 м/мин при шлифовании Al_2O_3 -TiC-керамики приводит к увеличению Ra в 1,54 (в продольном направлении) и 1,2 раза (в поперечном направ-

лении), повышение $S_{поп}$ от 0,5 до 1,5 мм/ход — в 1,5 и 1,3 раза, повышение t от 0,01 до 0,05 мм — в 1,4 и 1,15 раза соответственно.

С учетом выявленных особенностей состояния поверхности образцов из Al_2O_3 -TiC-керамики проанализируем результаты трибологических исследований.

На рис. 2 показаны зависимости влияния параметров режима шлифования на силу трения $F_{тр}$, коэффициент трения μ , ширину дорожки трения b и ширину участка износа h . Видно, что повышение $S_{пр}$ от 5 до 15 м/мин ($S_{поп} = 1$ мм/ход и $t = 0,04$ мм) приводит к увеличению $F_{тр}$ от 4,3 до 5,2 Н, μ от 0,26 до 0,35, b от 0,18 до 0,29 мм и h от 1,52 до 1,94 мм (см. рис. 2, а), повышение $S_{поп}$ от 0,5 до 1,5 мм/ход ($S_{пр} = 10$ м/мин и $t = 0,04$ мм) — к увеличению $F_{тр}$ от 4,4 до 5,5 Н, μ от 0,28 до 0,38, b от 0,19 до 0,32 мм и h от 1,92 до 2,17 мм (см. рис. 2, б), повышение t от 0,01 до 0,05 мм ($S_{пр} = 10$ м/мин и $S_{поп} = 1$ мм/ход) — к увеличению $F_{тр}$ от 4,2 до 4,8 Н, μ от 0,26 до 0,36, b от 0,16 до 0,28 мм и h от 1,93 до 2,1 мм (см. рис. 2, в). Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшее влияние на трибологические характеристики оказывает поперечная подача при шлифовании, а продольная подача и глубина шлифования показывают меньший эффект.

Интенсификация режима алмазного шлифования и изменение морфологии и дефектности поверхности керамических образцов приводят к практически линейному увеличению значений всех трибологических характеристик. Минимальные значения тангенциальной силы F_t и коэффициента трения μ , а также ширины дорожки трения b и ширины участка износа h зафиксированы при испытаниях образцов, имеющих «сглаженную» и менее дефектную поверхность, образованную на менее интенсивных режимах шлифования. Наибольшие значения трибологических характеристик зафиксированы при испытаниях образцов, имеющих «грубую» и более

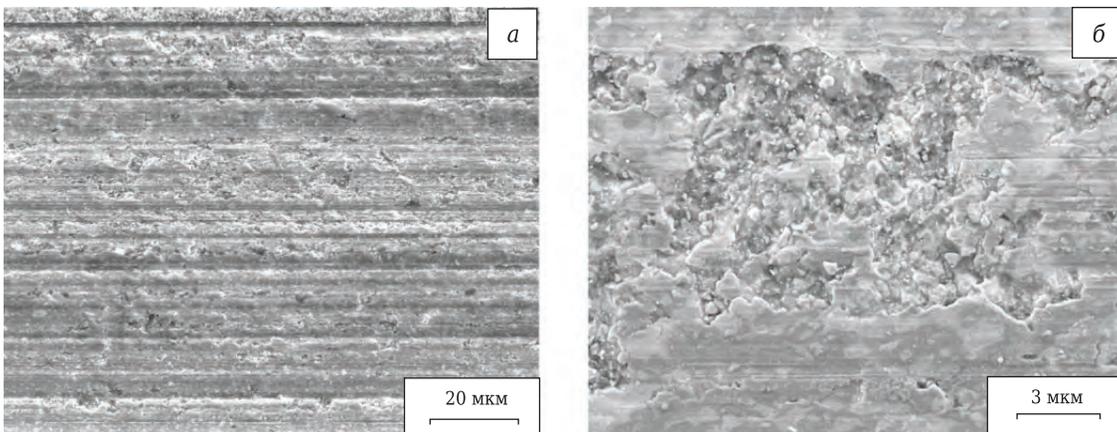


Рис. 1. Морфология поверхности образца Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования (а) и область локального разрушения (б)

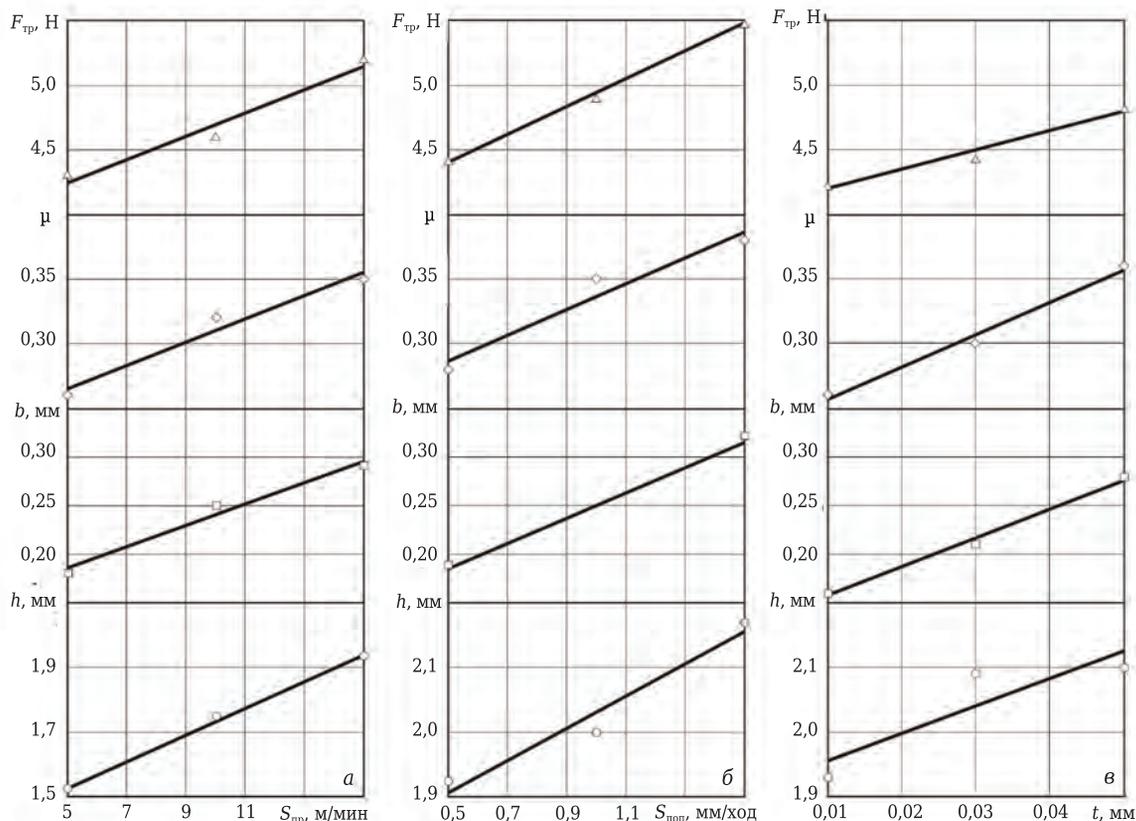


Рис. 2. Влияние $S_{пр}$ (а), $S_{поп}$ (б) и t (в) на трибологические характеристики поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики

дефектную поверхность, образованную на более интенсивных режимах шлифования. Сравнение результатов этого исследования с данными работы [13] показывает, что значения трибологических характеристик для Al_2O_3 -TiC-керамики в среднем в 1,2 раза меньше, чем у оксидной керамики, поверхность которой имела более развитую морфологию после шлифования.

Влияние рельефа и морфологии поверхности, формирующихся при определенном сочетании параметров режимов шлифования, на трибологические характеристики поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики можно объяснить следующим. В первоначальный момент скольжения стального шарика по керамическому образцу происходит контактное взаимодействие вы-

ступов, имеющихся на поверхностях этих контактирующих тел. Под действием силы трения размеры областей локальных разрушений 1 увеличиваются (рис. 3, а), в результате чего возрастает общая площадь повреждений на дорожке трения на поверхности керамических образцов.

После первичных контактов поверхности керамики и шарика происходит фрагментарное разрушение пластически деформированного слоя с «проявлением» исходной структуры керамики. Острые грани зерен инициируют многочисленные акты образования адгезионных связей и микрорезания поверхности шарика. В результате этих процессов на дорожке трения образуются «чешуйчатые» налипания стали 2 толщиной до 3 мкм, причем их внешняя поверх-

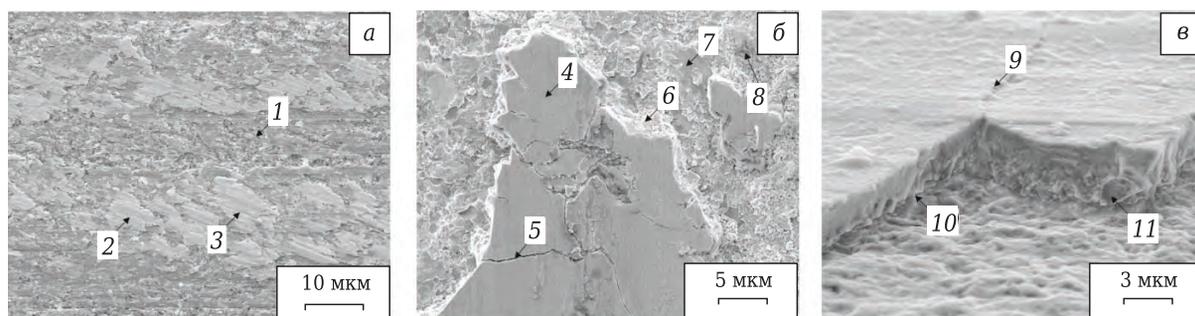


Рис. 3. Характер формирования налипаний на дорожке трения (а), разрушение пластически деформированного слоя (б) и исходной структуры (в) на участке износа Al_2O_3 -TiC-керамики

ность имеет гладкий морфологический рисунок с рисками 3, ориентированными в направлении скольжения шарика. Первоначально основной объем налипаний стали сосредоточивается во впадинах на поверхности керамики, а после заполнения их внутреннего пространства налипания начинают равномерно «намазываться» на всей контактной поверхности керамического образца. При дальнейшем трении шарика по поверхности керамики происходят явления, свойственные адгезионному износу: разрыв мостиков связи с вырывом отдельных зерен и их конгломератов из керамической матрицы.

При анализе участков износа, образовавшихся в результате трения вращающегося стального диска по шлифованной поверхности керамических образцов, выявлены особенности этого процесса трения. Обнаружены многочисленные налипания стали 4 толщиной до 5 мкм на поверхности керамики (рис. 3, б). На поверхности налипаний имеются многочисленные трещины 5, являющиеся результатом циклических силовых и тепловых нагрузок, генерируемых вращающимся диском. При этом трении площадь образовавшихся налипаний значительно больше площади налипаний от трения стальным шариком.

Образование и разрушение налипаний стали на керамической поверхности инициируют одновременное действие адгезионного и абразивного механизмов износа. На первом этапе износу подвержен пластически деформированный слой 6, образовавшийся при шлифовании, причем интенсифицируют его разрушение имеющиеся дефекты. Глубина участка износа на этапе обработки соответствует толщине этого слоя, что свидетельствует о значительном влиянии остаточных напряжений на границе слой – керамика после шлифования на характер износа поверхности керамики. После разрушения пластически деформированного слоя «вскрывается» структура керамики, морфологический рисунок которой формируют плоские площадки 7 и углубления 8, образовавшиеся в результате вырывания фрагментов зерен из керамического каркаса.

Библиографический список

1. **Adachi, K.** Wear map of ceramics / *K. Adachi, K. Kato, N. Chen* // *Wear*. — 1997. — Vol. 203/204. — P. 291–301.
2. **Kato, K.** Tribology of ceramics / *K. Kato* // *Wear*. — 1990. — Vol. 136. — P. 117–133.
3. **Wang, Yushu.** Wear and wear transition mechanisms of ceramics / *Yushu Wang, Stephen M. Hsu* // *Wear*. — 1996. — Vol. 195. — P. 112–122.
4. **Kato, Koji.** Wear of advanced ceramics / *Koji Kato, Koshi Adachi* // *Wear*. — 2002. — Vol. 253. — P. 1097–1104.
5. **Sullivan, J. L.** Microtribological studies of two-phase Al₂O₃-TiC ceramic at low contact pressure / *J. L. Sullivan, Baogui Shi, S. O. Saied* // *Tribology International*. — 2006. — Vol. 38. — P. 987–994.
6. **Кузин, В. В.** Особенности изнашивания и разрушения керамических режущих пластин / *В. В. Кузин, В. Н.*

При дальнейшем трении в пластически деформированном слое образуются многочисленные и разнонаправленные трещины 9 (рис. 3, в), рост которых приводит к разрушению и отслоению его фрагментов по хрупкому механизму. Облегчают этот процесс трещины 10, образовавшиеся на границе пластически деформированный слой – исходная керамика, рост которых также приводит к отделению зерен 11 от исходной поверхности керамики. Многократность представленного процесса приводит к образованию очага износа в виде лунки, наименьшие размеры которой зафиксированы на образцах со сглаженной поверхностью, а наибольшие значения — на образцах с грубой поверхностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что параметры режима шлифования образцов Al₂O₃-TiC-керамики существенно влияют на их трибологические характеристики, причем интенсификация режима приводит к практически линейному увеличению тангенциальной силы и коэффициента трения, ширины дорожки трения и ширины участка износа. «Мостиком», связывающим технологические и трибологические характеристики, являются морфология и дефектность поверхности керамики, сформированные при шлифовании. Установленные взаимосвязи параметров режима шлифования с трибологическими характеристиками позволяют прогнозировать интенсивность износа керамических деталей и инструментов на этапе технологической подготовки производства. С использованием этих взаимосвязей разработаны технологические рекомендации по нормированию качества керамических деталей на стадии их проектирования, повышающие надежность трибоузлов и режущих инструментов.

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.

Аникин, С. Ю. Федоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2010. — № 11. — С. 50–56.

Kuzin, V. V. Wear and failure of ceramic cutting plates / *V. V. Kuzin, V. N. Anikin, S. Yu. Fedorov* [et al.] // *Russian Engineering Research*. — 2010. — Vol. 30, № 11. — P. 1116–1123.

7. **Волосова, М. А.** Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / *М. А. Волосова, В. В. Кузин* // *Металловедение и термическая обработка*. — 2012. — № 1. — С. 40–46.

Volosova, M. A. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / *M. A. Volosova, V. V. Kuzin* // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.

8. **Kitajima, K.** Study on mechanism of ceramics grinding / *K. Kitajima, G. O. Cai, N. Kurnagai* [et al.] // *Annals of the CIRP*. — 1992. — Vol. 14. — P. 367–371.

9. **Tanovic, L.** Mechanisms in oxide-carbide ceramic BOK60 grinding / *L. Tanovic, P. Bojanic, M. Popovic* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 58. — P. 9–12.

10. **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.

11. **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* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.

12. **Кузин, В. В.** Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al_2O_3 -TiC-керамики при ал-

мазном 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* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.

13. **Кузин, В. В.** Влияние режимов алмазного шлифования на трибологические 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. ■

Получено 10.04.19

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

КОНФЕРЕНЦИИ И НАУЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО НАНОТЕХНОЛОГИЯМ

International Conference
Nano-M&D 2019
"Properties, Fabrication and Applications of Nano-Materials and Nano-Devices"
Paestum, Italy, June 04-08, 2019

International Conference on
Materials Research and Nanotechnology
Theme: Outlining the forefront Research: Materials Science & Nanotechnology
June 10-12, 2019
Rome, Italy

Nano congress 2019
31st Nano Congress For Future Advancements
August 29-31, 2019 | London, UK
Theme: Invention Of New Concept In The Field Of Nanotechnology
<https://nanocongress.nanotechconferences.org/>

NANO KOREA 2019
July 2 ~ 5, 2019 KINTEX, Ilsan, Korea
July 2 : Tutorial Session | July 3~5 : Symposium & Exhibition