

Шероховатость высокотвердой керамики

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

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

УДК 666.3:546.623-31]:[621.923.4:621.921.34

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕЖИМОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ Al_2O_3 -КЕРАМИКИ

Приведены результаты исследования влияния режимов плоского шлифования алмазными кругами на состояние поверхности Al_2O_3 -керамики. Установлена взаимосвязь глубины шлифования, продольной и поперечной подач с шероховатостью, волнистостью и морфологией обработанной поверхности.

Ключевые слова: шлифование, керамика, обработанная поверхность, шероховатость, волнистость, морфология поверхностного слоя керамики.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства машин определяются условиями контактного взаимодействия узлов и деталей [1]. Трибологические свойства, износостойкость, усталость деталей, а также контактная жесткость и герметичность соединений в узлах машин зависят от состояния поверхностей изготовленных деталей [2, 3]. Их геометрические параметры, шероховатость, волнистость и отклонение от идеальной геометрической формы, формирующиеся в процессе изготовления, определяют важность задачи обеспечения необходимого качества деталей. Решение этой задачи приобретает особую актуальность при изготовлении деталей из разных керамических материалов [4, 5]. Это связано прежде всего с ограниченностью технологических методов, пригодных для обработки высокотвердой керамики, а также со спецификой процесса снятия припуска, в котором одновременно участвуют механизмы хрупкого и пластического разрушения [6, 7].

В МГТУ «Станкин» проведен комплекс исследований по выявлению взаимосвязи режимов шлифования с состоянием поверхности образцов разных керамических материалов. Результаты этих исследований будут представлены в цикле статей под рубрикой «**Шероховатость высокотвердой керамики**». Первая статья посвящена обработке керамики на основе оксида алюминия, широко используемой для изготовления деталей, крайне востребованных в многих областях применения.

Исследованию процесса шлифования алмазными кругами Al_2O_3 -керамики посвящены многочисленные работы, в которых анализируются отдельные аспекты многоуровневой проблемы. Механизм формирования поверхностного слоя Al_2O_3 -керамики при шлифовании за счет образования трещин, зарождающихся на внутренней поверхности риска и распространяющихся в объем заготовки, описан в статьях [8, 9]. Выявлены [8] особенности рельефа обработанной поверхности Al_2O_3 -керамики с многочисленными рисками разной глубины, дно и боковые поверхности которых образованы слоем сглаженного материала. На вершинах риска образуются наплывы, размеры которых зависят от глубины внедрения алмазных зерен в поверхность керамического образца. При малой глубине их внедрения наплывы, имеющие форму микровала, достаточно равномерно чередуются на шлифованной поверхности. При большой глубине внедрения алмазных зерен в поверхность керамического образца образуются волнообразные наплывы, хаотично расположенные на керамической поверхности. С интенсификацией режима шлифования увеличивается шероховатость обработанной поверхности [11]. Влияние рельефа поверхности керамики на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя Al_2O_3 -керамики при высоких температурах описано в статьях [12, 13]. Установлено [14], что на обработанной поверхности Al_2O_3 -керамики образуются волны двух типов, имеющие разную природу появления. С интенсификацией режимов шлифования амплитуда этих волн возрастает, причем наибольшее влияние на волнистость обработанной поверхности оказывают скорость круга и продольная подача при шлифовании.



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

Короткий анализ научно-технической литературы показывает отсутствие общего подхода к разработке технологии алмазного шлифования. Цель настоящей работы — изучить влияние режимов алмазного шлифования на шероховатость, волнистость и морфологию поверхностного слоя Al_2O_3 -керамики для использования выявленных взаимосвязей при создании технологических процессов изготовления керамических деталей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой экспериментальных исследований являлся системный подход к изучению и описанию процессов, происходящих при образовании поверхностного слоя заготовок из разных керамических материалов при шлифовании алмазными кругами, с использованием современного оборудования и измерительной техники [15–17]. Экспериментальные исследования выполнены на образцах Al_2O_3 -керамики, структура которой показана на рис. 1. Керамика имеет крупнозернистую структуру, которая характеризуется многогранными

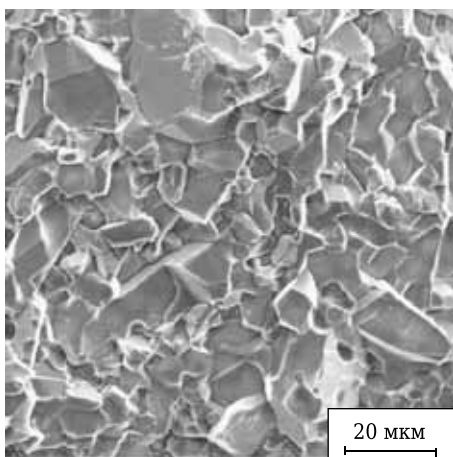


Рис. 1. Структура керамических образцов (однократное ударное нагружение)

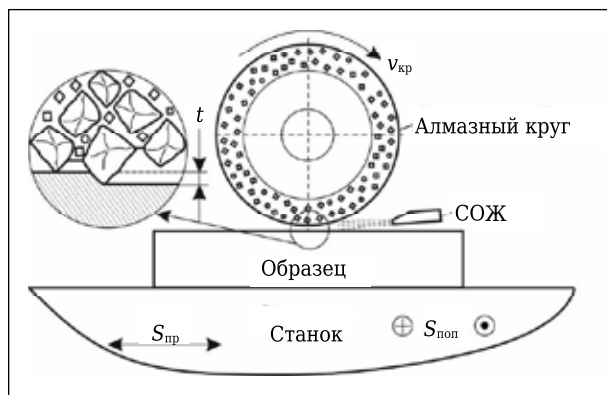


Рис. 2. Схема процесса алмазного шлифования керамических образцов

зернами размерами до 20 мкм с четко выраженными границами между ними. На отдельных зернах имеются трещины, а на границах — глубокие поры неправильной формы размерами до 7 мкм. Образцы Al_2O_3 -керамики имели предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ 350 МПа, трещиностойкость K_{Ic} 3,5 МПа·м^{1/2}, плотность ρ 3,2 г/см³ и твердость HRA 92.

Керамические образцы шлифовали на станке модели ОШ-440 с использованием алмазного круга 1А1В2-01 100 % АС6 160/125 и смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) по схеме, показанной на рис. 2. Скорость круга во всех экспериментах оставалась постоянной $v_{кр} = 30$ м/с, продольную подачу изменяли в диапазоне $S_{пр} = 5 \div 15$ м/мин, поперечную подачу — в диапазоне $S_{поп} = 0,5 \div 1,5$ мм/ход, глубину шлифования — в диапазоне $t = 0,01 \div 0,05$ мм. После каждого эксперимента круг подвергали правке, а образцы ультразвуковой мойке в установке «Elmasonic S70» в течение 20 мин.

Состояние обработанной поверхности оценивали параметрами шероховатости Ra и волнистости Wa , а также ее морфологией. Шероховатость измеряли в продольном (вдоль продольной подачи) и поперечном (вдоль поперечной подачи) направлении, а волнистость оценивали в продольном направлении. Для измерения этих параметров использовали профилограф-профилометр «HommelTesterT8000», причем каждое измерение повторяли 3 раза. Морфологию обработанной поверхности изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMN. Для подготовки образцов для этого исследования применяли установку катодного распыления «Quorum Q150R ES», с помощью которой на шлифованную поверхность керамики наносили токопроводящую пленку углерода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние режима шлифования на Ra обработанной поверхности заготовок Al_2O_3 -керамики показано на рис. 3. Видно, что параметры режима шлифования существенно влияют на Ra . Интенсификация режима шлифования приводит к увеличению Ra как в продольном, так и в поперечном направлении обработанных поверхностей.

При увеличении $S_{пр}$ в диапазоне $5 \div 15$ м/мин ($S_{поп} = 1$ мм/ход, $t = 0,04$ мм) Ra шлифованной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики возрастает от 0,94 до 1,03 и от 1,02 до 1,14 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно (см. рис. 3, а). Увеличение $S_{поп}$ в диапазоне $0,5 \div 1,5$ мм/ход ($S_{пр} = 10$ м/мин, $t = 0,04$ мм) приводит к возрастанию Ra соответственно от 0,9 до 1,09 и от 1,01 до 1,2 мкм (см. рис. 3, б). При увеличении t в диапазоне $0,01 \div 0,05$ мм

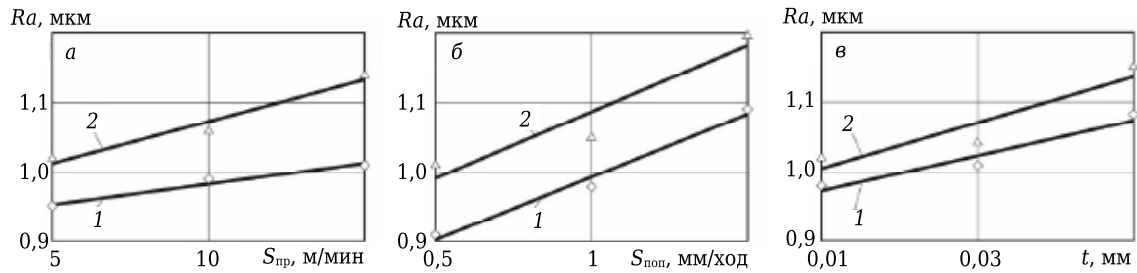


Рис. 3. Влияние $S_{пр}$ (а), $S_{поп}$ (б) и t (в) на Ra шлифованной поверхности керамических образцов в продольном (1) и поперечном (2) направлениях

($S_{пр} = 10$ м/мин, $S_{поп} = 1$ мм/ход) Ra возрастает соответственно от 0,98 до 1,08 и от 1,02 до 1,15 мкм (см. рис. 3, в). Все полученные зависимости с высокой точностью аппроксимируются прямыми линиями.

Установлено, что интенсификация режима шлифования приводит к увеличению параметра Wa обработанной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики (рис. 4). При увеличении $S_{пр}$ в диапазоне 5 ÷ 15 м/мин ($S_{поп} = 1$ мм/ход, $t = 0,04$ мм) Wa возрастает от 3,4 до 6,1 мкм (рис. 4, а). С увеличением $S_{поп}$ в диапазоне 0,5 ÷ 1,5 мм/ход ($S_{пр} = 10$ м/мин, $t = 0,04$ мм) Wa возрастает от 3,9 до 6,1 мкм (рис. 4, б). Увеличение t в диапазоне 0,01 ÷ 0,05 мм ($S_{пр} = 10$ м/мин, $S_{поп} = 1$ мм/ход) приводит к росту Wa от 3,5 до 7,5 мкм (рис. 4, в). Столь существенное влияние режима шлифования на параметры Ra и Wa шлифованных поверхностей Al_2O_3 -керамики связано с разным уровнем силовых и тепловых нагрузок, генерируемых в зоне контакта алмазного круга с заготовкой, под действием которых происходит формирование поверхностного слоя керамики.

В результате анализа экспериментальных данных выявлено также влияние режима алмазного шлифования на морфологию обработанных поверхностей. Примеры этого влияния в виде микрофотографий поверхности керамических образцов, шлифованных при разных режимах, показаны на рис. 5. Их детальное изучение показало, что в результате контактного взаимодействия алмазных зерен, расположенных в поверхностном слое шлифовального круга, с поверхностью керамики происходит снятие припуска с керамической заготовки с образованием

новой поверхности. Вне зависимости от режима шлифования эта поверхность характеризуется четко выраженным волнообразным рельефом с гребнями, ориентированными по направлению поперечной подачи. Волнообразный рельеф создает слой пластически деформированной керамики толщиной до 0,6 мкм, имеющий высокую дефектность за счет присутствия в нем многочисленных рисок, трещин и областей локального разрушения. Наиболее «высокие» гребни волн срезаны алмазными зернами и имеют вид плоских площадок. Поверхность керамики, свободная от этого слоя, имеет многочисленные углубления, поры и области локального разрушения разных размеров. Формирование поверхности со столь сложным морфологическим рисунком связано с одновременным действием механизмов хрупкого и пластического разрушения поверхностного слоя керамики.

Параметры режима шлифования изменяют в определенных пределах эти характерные признаки морфологии обработанной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики, особенно размеры гребней и пор. Это влияние проявляется через изменение вклада механизмов хрупкого и пластического разрушения поверхностного слоя керамики, зависящих от соотношения силовых и тепловых нагрузок, генерируемых в зоне контакта алмазных зерен с поверхностью керамики. Основной направленностью этого влияния при шлифовании Al_2O_3 -керамики является уменьшение числа и размеров поверхностных пор, а также увеличение размера гребней волнообразного рельефа, образованного слоем пластически деформированного материала,

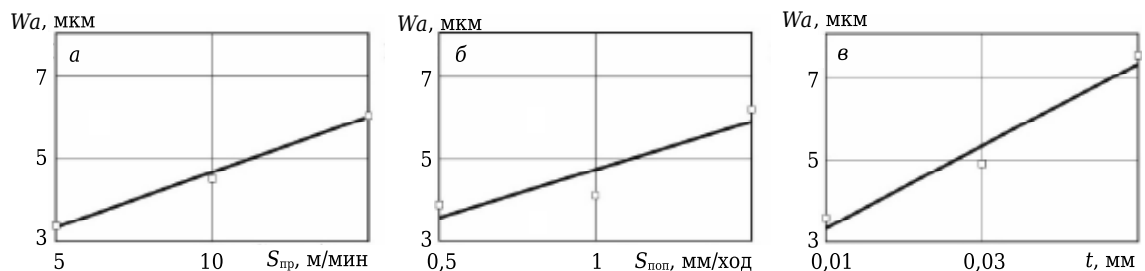


Рис. 4. Влияние $S_{пр}$ (а), $S_{поп}$ (б) и t (в) на Wa шлифованной поверхности керамических образцов

при интенсификации режима шлифования. Последовательно анализируем влияние параметров режима шлифования (продольной и поперечной подачи, глубины шлифования) на морфологию поверхности керамических образцов.

Влияние продольной подачи $S_{пр}$ на морфологию шлифованной поверхности керамических образцов показано на рис. 5, а. Видно, что на поверхности образцов Al_2O_3 -керамики, шлифованных при режиме $S_{пр} = 5$ м/мин ($S_{поп} = 1$ мм/ход, $t = 0,04$ мм), хорошо просматривается крупнозернистая структура керамики. Об этом свидетельствует большое число пологих углублений размерами до 50 мкм, дно которых образовано гранями зерен Al_2O_3 , залегающих ниже шлифованной поверхности. Срезанные грани зерен Al_2O_3 образуют плоские площадки, покрытые слоем деформированного материала. На этих площадках имеются неглубокие риски от алмазных зерен шириной до 10 мкм. Как правило, эти риски прерываются крупными пологими углублениями и порами округлой формы размерами до 10 мкм. По границам отдельных зерен «вскры-

ваются» крупные поры неправильной формы размерами до 15 мкм, образовавшиеся при спекании. После шлифования при $S_{пр} = 10$ м/мин ($S_{поп} = 1$ мм/ход, $t = 0,04$ мм) на поверхности образцов Al_2O_3 -керамики поры и углубления проявляются менее четко, но ее рельефность увеличивается. Следы пластической деформации слоя керамики обнаруживаются не только на «срезанных» вершинах крупных зерен Al_2O_3 , но и на мелких зернах. При этом уменьшаются число и размеры пологих углублений, а образующиеся единичные риски имеют повышенную ширину (до 15 мкм) по сравнению с предыдущим режимом шлифования. Увеличиваются также число и размеры областей локального разрушения керамики. После шлифования с наибольшей продольной подачей при режиме $S_{пр} = 15$ м/мин ($S_{поп} = 1$ мм/ход, $t = 0,04$ мм) поверхность образцов Al_2O_3 -керамики приобретает наиболее рельефную морфологию. Зафиксировано увеличение площади поверхности со следами интенсивных пластических деформаций, а также числа и протяженности рисок шириной до 20 мкм по сравнению с предыдущими режимами шлифования. На обработанной по-

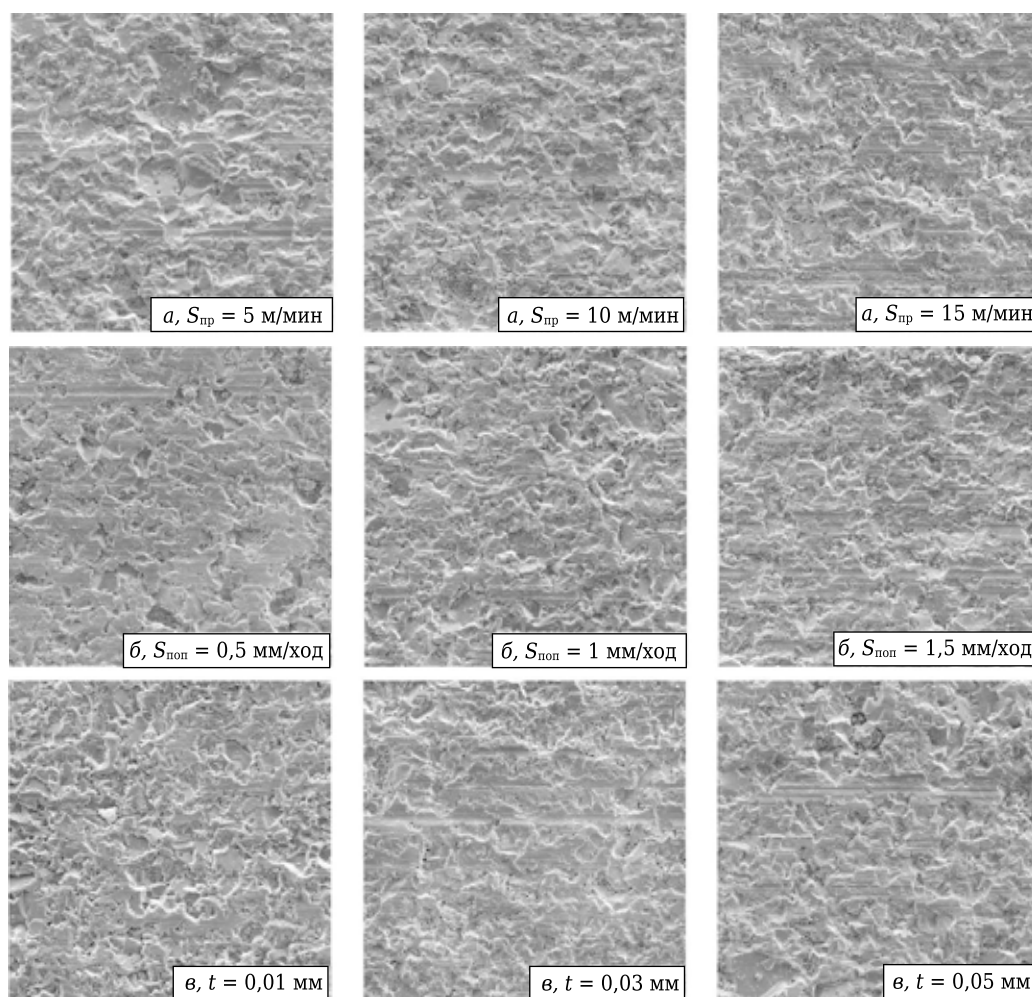


Рис. 5. Влияние $S_{пр}$ (а), $S_{поп}$ (б) и t (в) на морфологию шлифованной поверхности керамических образцов. $\times 1000$

верхности обнаружены многочисленные области локального разрушения керамики, природа появления которых связана с вырывом зерен (или их сколовшихся фрагментов) из керамического каркаса, а также с интенсивным развитием трещин в пластически деформированном слое.

Влияние поперечной подачи $S_{\text{поп}}$ на морфологию шлифованной поверхности керамических образцов показано на рис. 5, б. Видно, что на поверхности образцов Al_2O_3 -керамики, шлифованных при режиме $S_{\text{поп}} = 0,5$ мм/ход ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $t = 0,04$ мм) имеются многочисленные сглаженные площадки, образованные в результате срезания верхушек зерен Al_2O_3 . Эффект сглаженности поверхности усиливается минимальным размером гребней волнообразного рельефа и практическим отсутствием рисков от алмазных зерен. На обработанной поверхности имеется большое число пор размерами до 15 мкм и углублений размерами до 50 мкм. Дно углублений образовано гранями одного или нескольких зерен, а также скоплением мелких зерен округлой формы. Поверхность образцов Al_2O_3 -керамики, шлифованных при режиме $S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $t = 0,04$ мм) имеет более четкий волнообразный рельеф (по сравнению с предыдущим режимом), на котором просматриваются отдельные риски шириной 10 мкм и длиной до 50 мкм. Заметно уменьшается число крупных пор при одновременном увеличении пор размерами до 5 мкм. Дальнейшее увеличение поперечной подачи до $S_{\text{поп}} = 1,5$ мм/ход ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $t = 0,04$ мм) приводит к образованию наиболее рельефной поверхности образцов Al_2O_3 -керамики после шлифования. На этой поверхности имеются многочисленные риски шириной до 20 мкм, имеющие наибольшую длину по сравнению с предыдущими режимами шлифования. Пластически деформированный материал заполняет пространство в крупных порах, в результате чего повышается площадь поверхности со следами интенсивных пластических деформаций и уменьшаются размеры пор. Одновременно с этим увеличиваются число и размеры областей локального разрушения поверхности керамики.

Влияние глубины шлифования t на морфологию шлифованной поверхности керамических образцов показано на рис. 5, в. Видно, что поверхность образцов Al_2O_3 -керамики, шлифованных при режиме $t = 0,01$ мм ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход), характеризуется наиболее выраженным волнообразным рельефом по сравнению с другими малоинтенсивными режимами шлифования. На поверхности присутствуют многочисленные сглаженные площадки пластически срезанных верхушек крупных зерен Al_2O_3 на фоне крупных углублений, в которых просматривается исходная структура крупнозернистой керамики. На поверхности имеются

поры округлой формы размерами до 15 мкм и единичные области локального разрушения керамики, а риски практически отсутствуют. При увеличении t до 0,03 мм ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход) морфология поверхности приобретает более выраженный волнообразный рельеф при минимальном числе пор. Большинство пор и углублений «замазываются» пластически деформированным материалом, а слой, созданный этим материалом, имеет обширные площади локального разрушения. На поверхности имеются протяженные риски шириной до 5 мкм, на краях которых формируются наплывы материала, выдавленного из внутреннего объема рисок. После шлифования с наибольшей глубиной $t = 0,05$ мм ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход) ширина рисков увеличивается до 20 мкм. Увеличивается также количество мелких пор округлой формы и вытянутых пор по границам зерен. Поверхность керамических образцов после шлифования при этом режиме имеет наибольшее число и размеры областей локального разрушения керамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено влияние продольной и поперечной подачи, а также глубины при плоском алмазном шлифовании образцов Al_2O_3 -керамики на шероховатость, волнистость и морфологию обработанной поверхности. Увеличение $S_{\text{пр}}$ от 5 до 15 м/мин при шлифовании Al_2O_3 -керамики приводит к возрастанию Ra в 1,06 (в продольном направлении) и 1,12 раза (в поперечном направлении) и Wa в 1,8 раза. Увеличение $S_{\text{поп}}$ от 0,5 до 1,5 мм/ход при шлифовании Al_2O_3 -керамики приводит к возрастанию шероховатости Ra в 1,2 раза в обоих направлениях и Wa в 1,6 раза. Увеличение t от 0,01 до 0,05 мм при шлифовании Al_2O_3 -керамики приводит к возрастанию Ra в 1,1–1,13 раза в обоих направлениях и Wa в 2,2 раза.

Поверхность образцов Al_2O_3 -керамики после шлифования характеризуется четко выраженным волнообразным рельефом с гребнями, ориентированными по направлению поперечной подачи. Волнообразный рельеф образуется слоем пластически деформированной керамики толщиной до 0,6 мкм, причем наиболее «высокие» гребни волн срезаны алмазными зернами и имеют вид плоских площадок. Этот слой характеризуется высокой дефектностью из-за наличия многочисленных рисков, трещин и областей локального разрушения. Поверхность керамики, свободная от этого слоя, имеет многочисленные углубления, поры и области локального разрушения разных размеров. Параметры режима шлифования влияют на этот характерный морфологический рисунок обработанной поверхности керамики за счет изменения вклада в ее формирование механизмов хруп-

кого и пластического разрушения, зависящих от соотношения силовых и тепловых нагрузок, генерируемых в зоне контакта алмазных зерен с поверхностью керамики. Основной направленностью влияния режима шлифования является уменьшение числа и размеров поверхностных пор, а также увеличение размера гребней волнообразного рельефа, числа трещин и площади областей локального разрушения керамики при интенсификации режима шлифования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Библиографический список

1. **Демкин, Н. Б.** Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
2. **Суслов, А. Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. — М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.
3. **Сулима, А. М.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
4. **Кузин, В. В.** Анализ надежности керамических деталей после гидроабразивной обработки / В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров, В. И. Мороз // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 63–68.
5. **Кузин, В. В.** Analysis of the reliability of ceramic parts after hydroabrasive machining / V. V. Kuzin, N. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov, V. I. Moroz // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 631–636.
6. **Кузин, В. В.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 752/753. — P. 402–406.
7. **Кузин, В. В.** Модификация поверхностного слоя оксидной керамики с использованием непрерывного лазерного излучения / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 1. — С. 51–55.
8. **Кузин, В. В.** Oxide ceramic surface layer modification using continuous laser radiation / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 53–57.
9. **Кузин, В. В.** A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / V. Kuzin // Key Engineering Materials. — 2012. — Vol. 496. Precision Machining. — P. 127–131.
10. **Кузин, В. В.** Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramics with brazed diamond wheels / C. Jianyi, S. Jianyun, H. Hui, X. Xipeng // Journal of Materials Processing Technology. — 2010. — Vol. 210. — P. 899–906.
11. **Кузин, В. В.** 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.
12. **Кузин, В. В.** Study on mechanism of ceramics grinding / K. Kitajima, G. O. Cai, N. Kurnagai, Y. Tanaka // Annals of the CIRP. — 1992. — Vol. 14. — P. 367–371.
13. **Кузин, В. В.** Advanced ceramics: evaluation of ground surface / E. C. Bianchi, P. R. Aguiar, E. J. da Silva, C. E. da Silva Jr., C. A. Fortulan // Ceramica. — 2003. — Vol. 49. — P. 174–177.
14. **Кузин, В. В.** Effect of thermal loading on stresses in defective surface layer of ceramics / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Portnoy // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 189–192.
15. **Кузин, В. В.** Stress state of surface layer of oxide ceramics with single defect under the influence of intensive heat flow / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. R. Portnoy // 53rd Conference on Experimental Stress Analysis — EAN 2015, 1–4 June, 015, Czech Republic; ed. by P. Padevët and P. Bittnar. — P. 207–211.
16. **Кузин, В. В.** Experimental research on grinding surface waviness of engineering ceramics / Y. F. Diao, Y. G. Wang, B. Lin, L. J. Li // Materials Science Forum. — 2014. — Vol. 770. — P. 175–178.
17. **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.
18. **Кузин, В. В.** 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.
19. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.
20. **Кузин, В. В.** Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.
21. **Кузин, В. В.** Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на основе нитрида кремния / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2006. — № 8. — С. 19–24.
22. **Кузин, В. В.** 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. ■

Получено 16.06.16

© В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, 2016 г.