

Д. т. н. **В. В. Кузин**¹ (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**¹, к. т. н. **С. Ю. Фёдоров**¹,
к. т. н. **К. В. Вепринцев**², **Н. Р. Портной**¹, к. т. н. **И. И. Сазанов**¹

¹ ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин»,
Москва, Россия

² ООО «Завод технической керамики», Москва, Россия

УДК 621.924.93:666.3

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ ПОСЛЕ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Установлено, что под воздействием гидроабразивной струи существенно изменяется морфология поверхности высокоплотной керамики, причем ее структурный рисунок определяется условиями контакта струи, керамического образца и рабочей жидкости. Дефектов хрупкого происхождения на обработанных поверхностях не обнаружено.

Ключевые слова: высокоплотная керамика, гидроабразивная обработка, морфология поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением работы, описанной в статье [1].

Создание благоприятной морфологии поверхности керамических деталей обеспечивает уменьшение интенсивности их износа, увеличение надежности и расширение области их применения в инновационных машинах [2]. Для управления морфологией поверхности используют разные технологические методы, среди которых выделяется гидроабразивная обработка с ее специфическим инструментом — гидроабразивной струей, свойства которой можно изменять в широком диапазоне [3]. За счет изменения режима обработки обеспечивается разный уровень воздействия на поверхность, под действием которого формируется ее морфология.

В работе поставлена цель — изучить влияние гидроабразивной обработки на морфологию поверхности деталей из высокоплотной керамики. Экспериментальные исследования проводили с использованием шведской установки гидроабразивного резания «MicroWATERJET F4». В качестве заготовок применяли пластины из оксидной керамики (93–94 HRA, $\sigma_{изг} = 420$ МПа). Для оценки состояния обработанных поверхностей использовали оптический микроскоп ИМЦЛ 200×75А, стереомикроскоп «SteREO Discovery.V12» и электронно-сканирующий микроскоп VEGA3 LMN фирмы «Tescan», Чехия. Более подробно методика исследования изложена в работе [1].

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построенная ранее [1] 3D-модель керамической заготовки при гидроабразивном резании и ее фрагмент (сечение А–А) показаны на рис. 1, а. На этом фрагменте изображены: входная криволинейная поверхность Кр (от линии $a_1 - a_1^1$ до линии $b - b^1$), наклонная поверхность П1 (от линии $b - b^1$ до линии $c - c^1$), вертикальная поверхность П2 (от линии $c - c^1$ до линии $d - d^1$) и наклонная поверхность П3 (от линии $d - d^1$ до линии $e - e^1$). На рис. 1, б показан вид сверху на керамический образец, на котором выделена криволинейная поверхность Кр. Общий вид одной из поверхностей профиля реза с нанесенными границами характерных областей (Кр, П1, П2 и П3) приведен на рис. 1, в, вид на нижнюю (опорную) поверхность керамической заготовки — на рис. 1, г. Анализ морфологии каждой из этих поверхностей позволил выявить их отличительные особенности. Последовательно проанализируем эти особенности.

В первоначальный момент обработки гидроабразивная струя активно воздействует как на торцевую, так и на верхнюю поверхность керамической заготовки за счет ее фактического разделения на два потока. Основной поток не изменяет направление движения и перемещается вдоль торцевой поверхности керамической заготовки, формируя при этом устье реза. Значительно меньший по объему поток гидроабразивной струи изменяет направление и перемещается по верхней поверхности керамической заготовки. В результате этого воздействия существенно изменяется морфология этой поверхности по сравнению с исходной.

Типичным структурным рисунком исходной поверхности керамической заготовки яв-

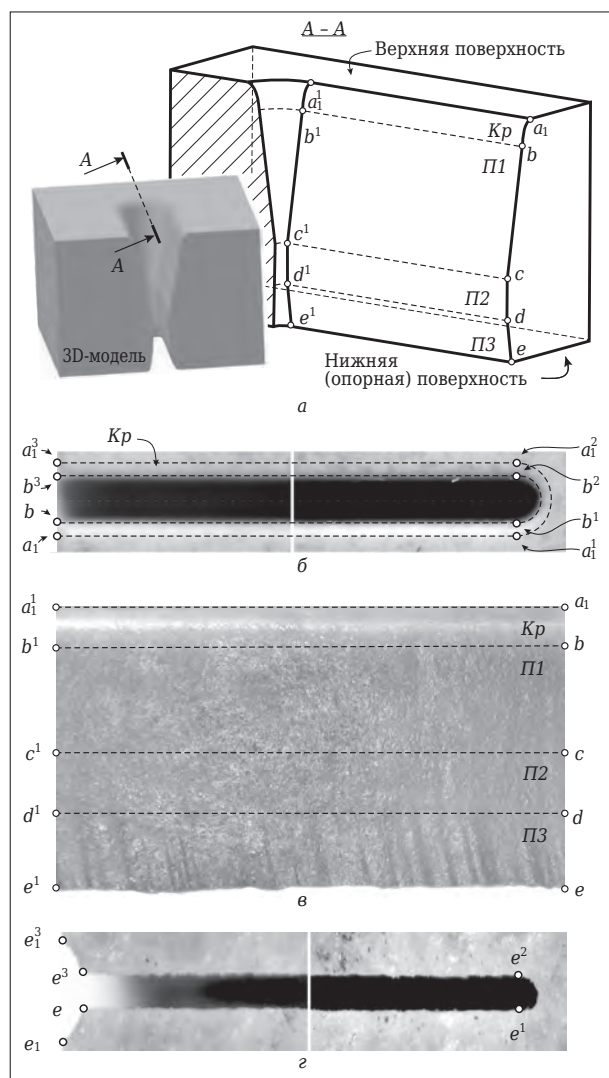


Рис. 1. Детализированный вид поверхностей, сформировавшихся в процессе гидроабразивного резания образца из высокоплотной оксидной керамики

ляются чередующиеся непрерывные выступы и канавки (рис. 2, а), которые формируются рабочей частью шлифовального круга в результате микрорезания алмазными зернами [4]. На этой поверхности присутствуют многочисленные трещины и области локальных разрушений керамики, имеющих хрупкую природу появления [5]. Наибольшее число этих областей (до 80 %) имеют неправильную форму с острыми краями размером до 10 мкм, что свидетельствует о том, что разрушение произошло в результате отрыва одного зерна или конгломерата нескольких зерен из керамического каркаса [6]. Достаточно часто эти области локальных разрушений соединяются с образованием «борозд» локальных разрушений, ориентированных вдоль направления шлифования [7].

Структурный рисунок этой поверхности керамического образца после гидроабразивного

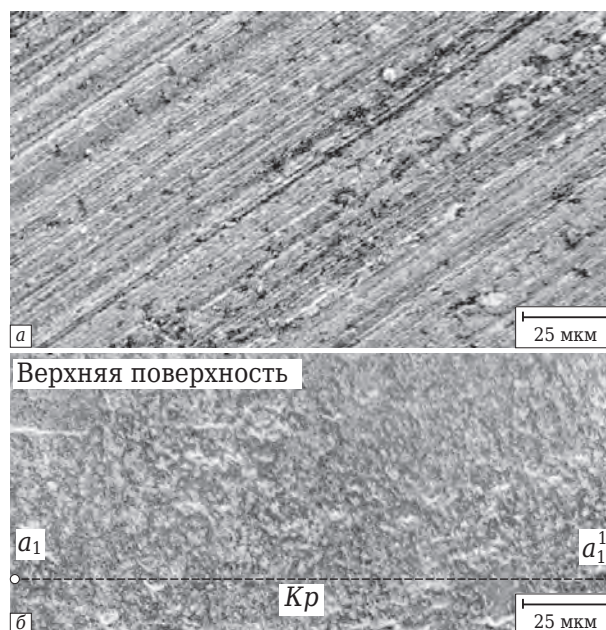


Рис. 2. Морфология верхней поверхности керамического образца до (а) и после гидроабразивной обработки (б)

воздействия показан на рис. 2, б (рассматриваемая поверхность расположена выше линии $a_1 - a_1^1$). Видно, что на поверхности отсутствуют: 1 — направленный рисунок и 2 — дефекты в виде трещин и областей локального разрушения поверхностного слоя керамики. Главной морфологической чертой этой поверхности является ее шагреновый рисунок с мелкими гладкими выступами волнообразной формы. Размеры этих выступов изменяются в широких пределах (0,5 – 10 мкм), причем по мере удаления от линии $a_1 - a_1^1$ размеры выступов заметно уменьшаются. Обращают на себя внимание несколько областей с практически ровной и гладкой поверхностью, происхождение которых можно связать с транскристаллитным разрушением крупных зерен.

Входная криволинейная поверхность Kp на профиле реза характеризуется двумя сильно различающимися структурными рисунками (рис. 3, а). Этот факт можно связать с особенностями контакта гидроабразивной струи с поверхностями керамического образца и рабочей жидкостью. Примыкающий к верхней поверхности керамического образца участок поверхности Kp_1 имеет сильно развитый рельеф с большим числом чередующихся ямок и выступов разного размера. Все поверхности ямок и выступов имеют сглаженные формы, однако вершины выступов заострены. Размеры ямок изменяются от 0,5 до 15,0 мкм, причем наибольший размер имеют ямки, соединившиеся в одну из нескольких расположенных рядом. Острые выступы на этой поверхно-

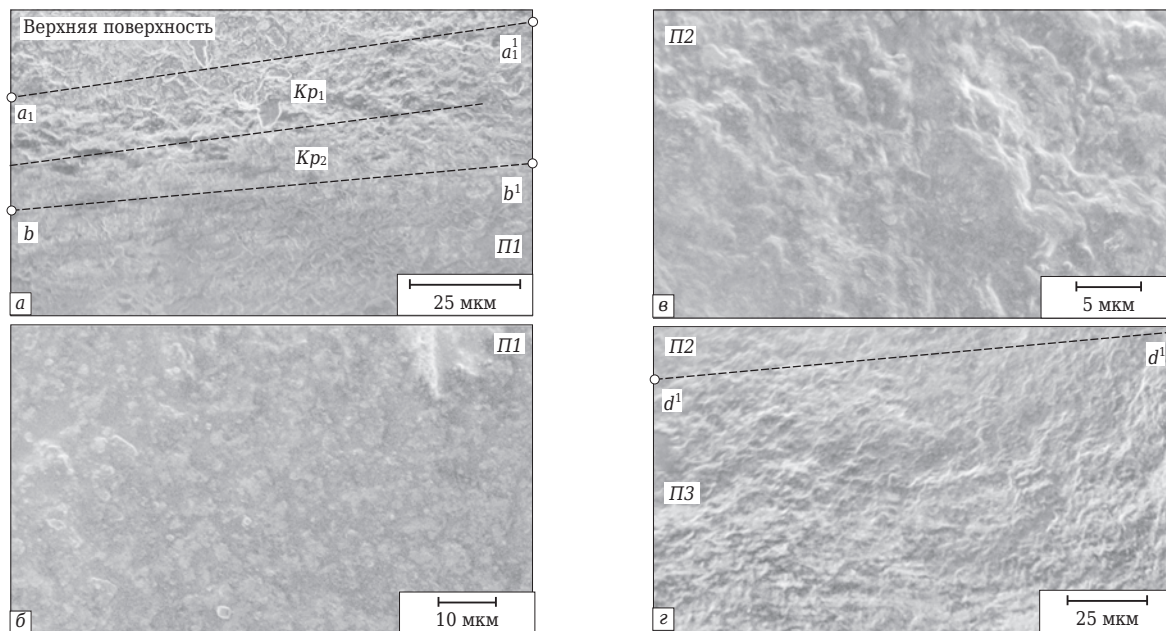


Рис. 3. Морфология поверхностей керамического образца, сформировавшихся при гидроабразивном резании

сти соединены в практически непрерывные ряды.

Участок поверхности Kp_2 , примыкающий к поверхности $П1$ керамического образца, имеет стабильно сглаженный структурный рисунок. На поверхности имеются следы от ямок значительных размеров, которые первоначально имели такие же форму и размеры, как ямки, расположенные на поверхности Kp_1 . Однако изменение условий контакта гидроабразивной струи с поверхностью керамического образца и рабочей жидкостью по мере формирования криволинейной поверхности Kp приводит к тому, что скользящие абразивные частицы полируют эту поверхность и сглаживают ямки.

Наклонная поверхность $П1$ имеет стабильный рисунок рельефа, заключающийся в сочетании разных по размерам сглаженных выступов с округленной вершиной, выступающих над практически плоской поверхностью (рис. 3, б). Размеры этих выступов изменяются в очень широком диапазоне, причем они имеют несимметричный вид и под большим углом ориентированы в направлении поступающей гидроабразивной струи. Выступы разделяются промежутками, форма которых напоминает протоки. Отличительной особенностью морфологии наклонной поверхности $П1$ являются риски, образовавшиеся в результате контактов с абразивными зернами, длиной до 20 мкм и шириной до 5 мкм. Боковые поверхности этих рисков являются гладкими, без трещин и областей локального разрушения керамики.

Число и размеры абразивных рисков увеличиваются на вертикальной поверхности $П2$

(рис. 3, в). Эта поверхность имеет более развитый рельеф по сравнению с поверхностью $П1$ за счет появившихся ямок и выступов с заостренными вершинами. Отмечено появление большого числа хаотично расположенных мелких ямок размерами до 1 мкм. На поверхности $П2$ трещин и областей локального разрушения керамики также не обнаружено.

Слой керамики на наклонной поверхности $П3$ характеризуется большим числом мелких выступов и неравномерно распределенными ямками (рис. 3, г). Статистический анализ показал, что площадь этих углублений составляет 25 – 33 % общей площади поверхности $П3$. В непосредственной близости от линии $d - d^1$ (граница поверхностей $П2$ и $П3$) формируются крупные выпуклости и впадины, определяющие характерную волнистость этой поверхности. На приведенном фото хорошо виден шаг образующихся соседних волн. Отмечено, что поверхность впадин более сглажена, чем поверхность выступов.

Установлено, что режимы гидроабразивной обработки принципиально не изменяют морфологию образующихся поверхностей, но существенно влияют на шероховатость обработанных поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено, что под воздействием гидроабразивной струи существенно изменяется морфология поверхности высокоплотной керамики, причем структурный рисунок определяется услови-

ями контакта струи, керамического образца и рабочей жидкости. Все сформированные поверхности имеют сглаженный рельеф, на котором в отдельных случаях образуются риски от контакта абразивных зерен с поверхностью керамики. Дефектов в виде трещин и областей локального разрушения керамики, характерных для алмазного шлифования, на поверхностях, образованных гидроабразивной струей, не обнаружено. Режимы гидроабра-

зивной обработки принципиально не изменяют морфологию поверхности высокоплотной керамики.

* * *

Данные прикладные научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта — RFMEFI57414X0003).

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Модель формирования профиля реза при гидроабразивной обработке высокоплотной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, К. В. Вепринцев, Н. Р. Портной, И. И. Сазанов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 51–56.
2. Старков, В. К. Повышение эксплуатационных характеристик изделий из керамических материалов методами механической и термической обработки / В. К. Старков, В. В. Кузин, В. Ф. Попов [и др.]. — М. : ВНИИТЭМР. Машиностроительные производства. Сер. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении : обзорная информ. — 1989. — Вып. 4. — 62 с.
3. Полянский, С. Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки / С. Н. Полянский, А. С. Нестеров // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 43–46.
4. 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.

5. **Kuzin, V.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752–753. — P. 402–406.

6. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.

Kuzin, V. V. Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.

7. **Kuzin, V.** 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. ■

Получено 13.12.14

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров,
К. В. Вепринцев, Н. Р. Портной,
И. И. Сазанов,
2015 г.

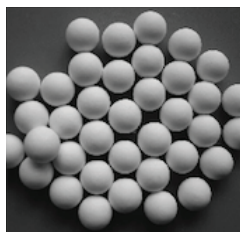
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**ASEAN
Ceramics
2015 Bangkok**

ASEAN Ceramics 2015

9th -11th September 2015 BITEC | Bangkok | Thailand

Southeast Asia's international exhibition of machinery, technology and materials for manufacturing whiteware, heavy clay and advanced ceramics.



**Южноазиатская международная
выставка по керамике —
ASEAN Ceramics 2015**



9–11 сентября 2015 г.

г. Бангкок, Таиланд

<http://asean ceramics.com/>