

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.923

В. П. БАХАРЕВ

**ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
МЕТОДАМИ ДОВОДКИ**

В статье представлено исследование технологических свойств процесса механической обработки изделий из технической керамики и влияния состояния поверхностного слоя изделия на показатели прочности. Было экспериментально подтверждено доминирующее влияние технологической среды на механизм разрушения при образовании поверхностного слоя изделий из конструкционной керамики. *Керамический материал; обработка изделий из керамики; управление дефектностью поверхности при механической обработке керамики; качество обработанной поверхности изделий из керамики*

Керамиками в современном представлении называют все неорганические неметаллические твердые тела, полученные путем спекания и обжига. На одном конце этого ряда веществ находятся однофазные керамики, такие, как оксид алюминия, германий кремний, имеющие широкое применение в электронной технике. На другом конце керамического ряда находятся традиционные керамические материалы (КМ): композиты, стекло, ситаллы, огнеупоры – это, как правило, многофазные керамики [1], способные работать в экстремальных условиях. Объединяет названные материалы этого ряда то, что это твердые хрупкие материалы (ХНМ) с относительно невысокой прочностью на разрыв.

Перспективность керамических материалов обусловлена многими факторами:

- доступностью сырья, в том числе бескислородной керамики, заменяющей дефицитные материалы;
- технология получения керамики, как правило, менее энергоемка, чем производство альтернативных металлических материалов;
- производство керамических материалов позволяет принимать экологически оправданные технические и технологические решения; не загрязняет окружающую среду, в той мере как металлургия;
- некоторые керамические материалы обладают хорошей биологической совместимостью, что позволяет использовать их в медицине, биотехнологии и генной инженерии.

**1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

Все разновидности керамики можно условно разделить на две группы: 1) конструкционные; 2) функциональные [2].

К *конструкционным* относятся материалы, которые независимо от формы детали должны обеспечивать ее механическую прочность, т. е. выдерживать растягивающие, сжимающие, изгибающие нагрузки:

- машиностроительные материалы – жаропрочные (для производства элементов поршневых двигателей, клапанов, камер сгорания и сопел, подшипников и т. п.), инструментальные (для производства лезвийных и абразивных инструментов), с высоким сопротивлением изнашиванию (для производства подшипников, направляющих, сопел и др.);
- биокерамика на основе  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , гидрооксипатитов для производства эндопротезов, сердечных клапанов и т. п.;
- термоизоляционные материалы, используемые при производстве термозащитных покрытий, работающих при температурах до  $2000^\circ C$ .

Как установлено в [1], большинство керамических материалов могут быть разделены на однородно и комбинированно дефектные. Комбинированно дефектные материалы имеют различную дефектность поверхности и объема. При этом поверхностная дефектность, полученная в результате механической обработки, может существенно преобладать над объемной. Структура поверхностных слоев деталей из керамики формируется на протяжении всего периода изготовления детали от формования за-

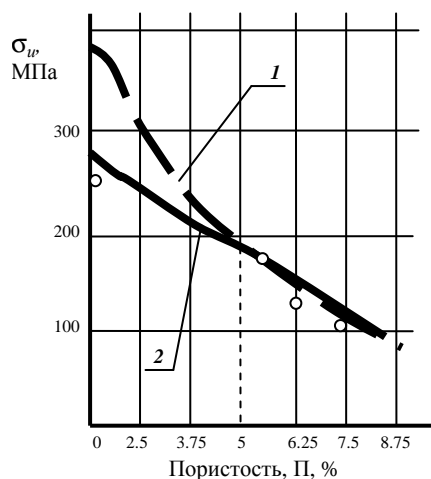
готовки до финишных операций.

Даже мягкие режимы обработки при шлифовании приводят к образованию микротрещин на поверхности керамики, которые уменьшают уровень механической прочности [2]. К обработочным дефектам относят поверхностные трещины вследствие силового воздействия режущего инструмента, термомеханического удара и микротрещины, возникшие в результате воздействия остаточных напряжений в обрабатываемом материале. Из условий формирования дефектов можно считать, что плотности вероятности распределения структурных и обработочных дефектов не зависят друг от друга.

На рис. 1 приведены экспериментальные значения средней прочности на изгиб для оксидной керамики различной пористости по формуле (1). Показаны графики зависимости расчетной прочности керамики из  $Al_2O_3$  без учета (кривая 1) и с учетом влияния обработочных дефектов (кривая 2). Отклонение экспериментальных значений от расчетных с учетом дефектов обработки в поверхностном слое не превышают 5%.

$$\sigma_s = K(D^{-\alpha}) \exp(-bP) \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – разрушающее напряжение, МПа;  $K$ ,  $\alpha$ ,  $b$  – константы;  $D$  – средний диаметр зерна, мкм;  $P$  – пористость керамики, %.



**Рис. 1.** Зависимость прочности при изгибе  $\sigma_w$  образцов из конструкционной керамики ( $Al_2O_3$ ) от пористости  $P$

Разрушение механически обработанных образцов из комбинированно дефектных материалов всегда инициируется одним критическим поверхностным дефектом (слабейшим звеном). Для оценки существенного влияния масштабного фактора на прочность керамических изделий обычно применяются статистические мо-

дели, основанные на концепции слабейшего звена. В этом случае совместная плотность вероятности распределения дефектов структуры и обработочных дефектов определяется как

$$f(\alpha_c, l_c, \alpha_0, l_0) = f(\alpha_c, l_c) \cdot f(\alpha_0, l_0), \quad (2)$$

где  $l_c, l_0, \alpha_c, \alpha_0$  – размеры и ориентация дефектов структуры и поверхности.

При равенстве размеров дефектов обработки и структурных дефектов первые практически не оказывают влияния на прочностные свойства образцов из керамики, так как их плотность ниже плотности структурных дефектов. Постепенного снижения размеров и количества обработочных дефектов в поверхностном слое можно достичь за счет применения тонких методов обработки, например, доводки (притирки) поверхности с постепенным понижением размера зерна в пасте и рационального применения технологических сред. В настоящее время процесс доводки деталей из керамики относится к наименее изученным способам обработки, вследствие одновременного действия многочисленных физико-механических и химических процессов. Производительность, качество поверхности, энергетические затраты определяются как свойствами керамики, так и технологическими особенностями процесса резания.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особенностью проектирования технологий обработки ХНМ является неуправляемость свойствами материала на стадии производства заготовки (спекание и обжиг), а также большие припуски на первой операции. Получение точных размеров керамических заготовок после обжига невозможно в связи с многообразием и случайным характером факторов, влияющих на физико-химические процессы при обжиге [2]. Задачей технолога является обеспечение комплекса показателей качества поверхностного слоя за счет назначения технологических условий обработки: схемы обработки (ее геометрических и кинематических параметров), характеристик алмазного инструмента и режимов резания.

Построение технологического процесса изготовления деталей из конструкционной керамики основано на постепенном уменьшении дефектов обработки до состояния структуры дефектного слоя, при котором уровень обработочной дефектности оказывает незначительное влияние на прочностные свойства материала (например, не более 2–5%). Существующие в

настоящее время рекомендации по технологии доводки основываются, как правило, на эмпирических подходах. В связи с этим возникла необходимость проведения исследований физических механизмов процессов тонкой абразивной обработки ХНМ с целью их стабилизации на основе комплексного анализа взаимодействия технологической среды и обрабатываемой поверхности, а также создание физико-математической модели абразивного диспергирования. Наличие подобной модели позволяет прогнозировать выходные показатели процесса обработки, и появляется возможность создания управляемого технологического процесса [3]. Поэтому повышение эффективности механической обработки КМ обусловлено изучением закономерностей сложного многофакторного процесса.

Одним из современных подходов обеспечения эксплуатационных показателей изделий является концепция направленного формирования свойств, базирующаяся на представлении пути формирования как совокупности процессов изменения (трансформации) и сохранения (наследования) свойств предметов производства при изготовлении. Закономерности формирования показателей качества зависят как от состава используемых технологических методов, так и от структуры процессов [4].

Таким образом, проблема исследования заключается в необходимости изыскания путей и средств повышения функциональных показателей качества поверхности изделий из хрупких твердых керамик и в управлении дефектностью поверхности при механической обработке с использованием современных средств технологического оснащения. Для исследования подобных процессов наиболее целесообразным подходом является системный анализ и методика «черного ящика» [5].

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Явление структурной приспособляемости используются при анализе технологических процессов обработки материалов (шлифование, доводка и т. п.), близких к процессу внешнего трения и изнашивания. Для оценки этих явлений шлифование и доводку производили в рабочих средах, содержащих восстановители для нейтрализации защитного действия кислорода. Было использовано несколько составов СОТС с различными добавками ПАВ. При прочих равных условиях производительность шлифования с применением СОТС, содержащих ПАВ и вос-

становитель (глицерин 0,5–1%), оказалась в 2–2,5 раза выше. Шероховатость (параметр  $R_a$ ) при этом понизилась.

Ниже представлены результаты исследований диспергирования минералокерамики ВК-100 на операции доводки связанным абразивом – алмазным кругом типа АЧЦ 100×10×5×32 АСВ 63/50 МО4 100 в функции мощности энергетического воздействия. На рис. 2–4 изображены результаты эксперимента, реализующие предлагаемые выше условия: схема обработки – доводка связанным абразивом, используемая СОТС – 1% раствор соды кальцинированной в воде. В качестве переменных факторов были использованы  $X_1$  – связка круга,  $X_2$  – давление,  $X_3$  – скорость резания.

В качестве переменных нерегулируемых факторов были использованы связки различного содержания: Б1, Б156, БР, МО4, обладающие различными упругими и теплофизическими свойствами. Анализ приведенных зависимостей показал, что наиболее эффективной из рассмотренных является связка МО4, которая позволяет интенсифицировать процесс диспергирования. На органических связках (зависимость 2) наблюдается перегиб кривой, что свидетельствует о смене характера разрушения и интенсификации разрушения связки круга. Зависимость скорости диспергирования в функции мощности энергетического воздействия в зоне резания для инструмента на связке МО4 изображена на рис. 2, а (кривая 1).

Статистическая обработка результатов эксперимента с использованием связки МО4 позволила получить статистические модели вида:

$$q = 15,75 + 10,15P + 6,8P^2 + 7,2V - 6,3PV; \quad (3)$$

$$R_a = 0,46 - 0,1V + 0,06P - 0,03PV - 0,03V^2.$$

Анализ зависимостей (3) показывает, что на параметр  $R_a$  наибольшее влияние оказывает скорость резания. С увеличением скорости резания параметр  $R_a$  снижается, а при повышении давления  $P$  шероховатость возрастает, что свидетельствует о важном влиянии тепловой составляющей процесса диспергирования как на операциях предварительной, так и финишной обработки керамических материалов связанным абразивом.

В результате статистической обработки получено уравнение регрессии для параметра  $R_{\max}$

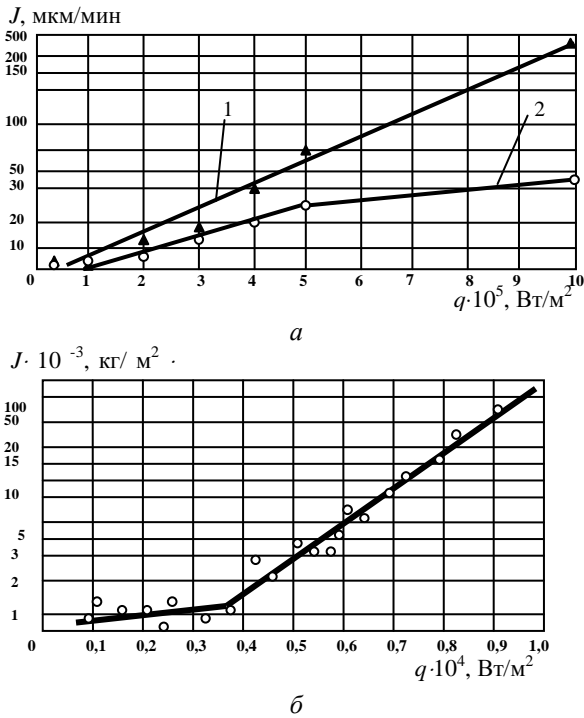
$$y = 0,53 + 0,12X_1, \quad (4)$$

где  $X_1$  – зернистость круга.

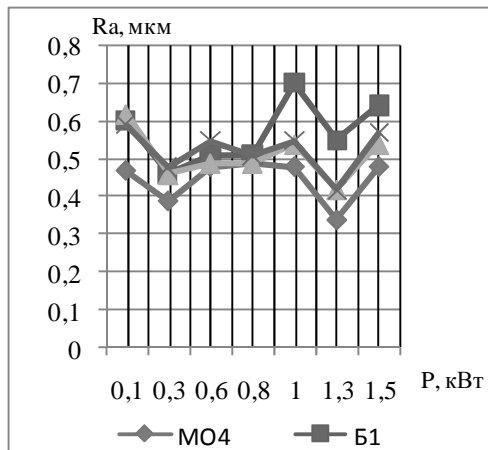
Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможном регулировании выходных параметров системы ре-

зания путем воздействия на характеристики технологической среды.

процессов разрушения в технологии финишной обработки керамических материалов.

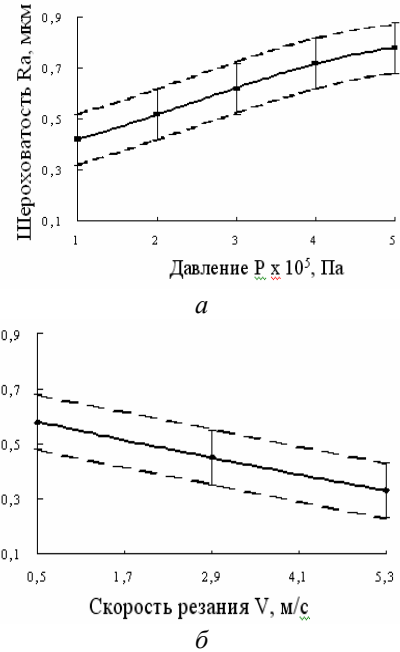


**Рис. 2.** Влияние теплового потока  $q$  на скорость абразивного диспергирования (а): 1 – связка МО4; 2 – связка Б1; скорость адгезионного изнашивания (б, [5])



**Рис. 3.** Зависимость шероховатости  $R_a$  от мощности силового взаимодействия ( $P \cdot V$ ) для различных связок алмазного круга

Корреляция процессов адгезионного разрушения (см. рис. 2, б) трибосопряжений и абразивного разрушения (см. рис. 2, а) в процессе доводки связанным абразивом свидетельствует об аналогичных физических механизмах разрушения на микроуровне. Таким образом, теоретические положения, устоявшиеся в трибологии, могут использоваться при анализе



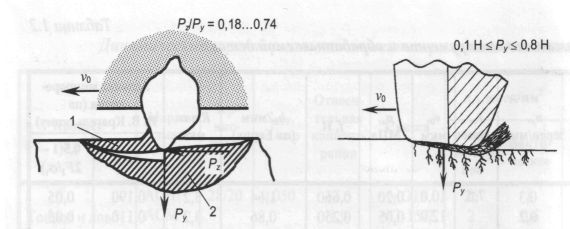
**Рис. 4.** Зависимость высоты микронеровностей  $R_{\text{max}}$  от давления  $P$  и скорости резания  $V$ : а – при  $V = 5 \text{ м/с}$ ; б – при  $P = 2 \times 10^5 \text{ Па}$

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применение технологических сред позволяет регулировать эффективность процессов абразивного диспергирования на микроуровне. Некоторые аналогичные результаты исследований механизма процессов шлифования и полирования синтетического корунда алмазно-абразивным инструментом представлены в работе [6]. На основе изучения с помощью электронной микроскопии поверхности образцов корунда, обработанных алмазным инструментом с различной зернистостью в присутствии разных СОТС, а также классификации видов износа при внешнем трении [7] было выдвинуто предположение, что шлифование соответствует микрорезанию (скалыванию), а полирование – износу при пластическом контакте (малоцикловому усталостному разрушению). На рис. 5 представлены схемы взаимодействия алмазного зерна с обрабатываемой поверхностью в различных физико-механических условиях зоны резания.

Поверхность разрушения обычно располагается ниже поверхности резания, в результате чего последняя покрыта следами от выломанных из нее кусочков стружки. Эти следы получили название сколов или выколов обработанной поверхности. Они гораздо больше по раз-

мерам расчетных величин, определяемых геометрией инструмента.



**Рис. 5.** Схема проникновения вершины алмазного зерна в обрабатываемый материал под действием усилия  $P_y$  и отделение стружки под действием  $P_z$ :  
 $a$  – для большинства хрупких материалов (1 – область сжатия, 2 – область растяжения);  
 $b$  – для германия и кремния (по данным [7])

Наличие сколов и выколов на поверхности, их глубина и ширина в основном определяют функциональные показатели обработанной поверхности. Управление процессом абразивного диспергирования путем создания технологических сред с требуемым набором функциональных характеристик позволит получить требуемые характеристики рабочих поверхностей изделий из керамических материалов.

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные результаты исследований процессов доводки КМ могут быть использованы при разработке методов финишной обработки изделий из керамики. Основные рекомендации по особенностям обработки КМ с использованием различных технологических сред изложены автором в [8].

## ВЫВОДЫ

Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на образование дефектного слоя и формирования показателей качества изделий из конструкционной керамики, является теплонапряженность процесса, которая определяет интенсивность трещинообразования.

Показана возможность управления выходными параметрами системы резания путем регулирования энергоемкости разрушения. При этом выходные параметры процесса резания определяются механизмом разрушения, обусловленным совокупностью свойств технологической среды. Реализация внутриверхнего скола путем использования эффективной СОТС, связки и зернистости круга позволяет получать заданные характеристики рабочих поверхностей. Исходя из особенности структуры поверхностного слоя керамики, технологи-

ческие свойства системы резания необходимо формировать на основе анализа комплексного воздействия среды на формируемую поверхность. Брак как результат механической обработки КМ встречается из-за следующих основных причин: сколов краев, несквозных трещин, микровыколов, глубоких единичных рисок с размерами больше допустимых по техническим условиям или параметра шероховатости ниже, чем задано на чертеже.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бахарев, В. П.** Конструкторско-технологическое сопровождение производства изделий из керамических и композиционных материалов / В. П. Бахарев // Конструкции из композиционных материалов. М.: 2008. Вып. 3.
2. **Technische Keramik: Aufbau, Eigenschaften, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung** // Hrsg.: Horst-Dieter Tietz. Düsseldorf: VDI-Verl. 1994. 364 с.
3. **Бахарев, В. П.** Оптимизация алмазной обработки керамики на основе системного анализа с использованием нейросетей / В. П. Бахарев, М. Ю. Куликов, Д. А. Нечаев [и др.] // Вестник машиностроения. 2008. Вып. 12. С. 31–35.
4. **Васильев, А. С.** Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев, А. Н. Дальский, С. А. Клименко [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.
5. **Якубов, Ф. Я.** Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. Я. Ким. Симферополь: Крымское уч.-пед. изд-во, 2005.
6. **Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке.** Т. 4 / Под ред. В. В. Рогова. Киев: ИСМ им. Бакуля, 2006.
7. **Костецкий, Б. И.** Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий [и др.]. Киев: Техніка, 1976.
8. **Бахарев, В. П.** Основы проектирования и управления процессами финишной обработки керамических композиционных материалов / В. П. Бахарев. Иваново: Ивановск. гос. ун-т, 2009. 240 с.

## ОБ АВТОРЕ



**Бахарев Вениамин Павлович,** доц. каф. технол. машиностр. филиала МГИУ в г. Кинешме. Канд. техн. наук по спец. 05.03.01 (Ивановск. гос. ун-т, 2001). Иссл. в обл. мех. обработки керамич. и композиц. материалов.