

УДК 621.892

## ПРЕЦИЗИОННАЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,  
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2025

В работе исследовано влияние нагрузочно-скоростных режимов изнашивания, структурного состава керамического алмазного материала на производительность шлифования и расход абразивного инструмента. Установлено, что определяющими факторами являются нагрузка на инструмент, его зернистость и концентрация алмазов, физико-механические свойства взаимодействующих материалов, глубина подачи. Получены зависимости параметров абразивного изнашивания от вида шлифования. Даны практические рекомендации по выбору диапазонов зернистости, концентрации алмазов, глубины шлифования, скорости обработки. Оценены марки алмазов.

*Ключевые слова:* прецизионная обработка, производительность шлифования, расход алмазов, режимы шлифования, алмазно-абразивная обработка, керамическая связка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-23-34**

### ВВЕДЕНИЕ

Алмазные абразивные инструменты востребованы при высокоеффективной и прецизионной обработке твердых и хрупких материалов, таких как техническая керамика, стекло, минералы [1–4]. При тенденции современного производства к повышению эффективности и внедрению нанотехнологий остро встает вопрос повышения качества изготовления деталей: обеспечения заданных геометрических размеров, микро- и наношероховатости поверхности изделия при сокращении времени обработки [5, 6]. При производстве абразивных инструментов в данных условиях важно определить направления улучшения структуры материала. Это является сложной технической задачей, так как алмазосодержащие инструменты представляют собой сложную структуру, синергетически объединяющую свойства матрицы, дисперсных алмазов и возможных наполнителей. Кроме того, необходимо выявить динамические факторы, определяющие режущую способность и стойкость инструмента [2, 7–9].

В современных исследованиях значительное внимание уделено факторам, определяющим работоспособность высокоресурсного алмазно-абразивного инструмента для сверхточного шлифования [2–7, 10, 11]. В работе [3] представлены экспериментальные и модельные результаты испытаний гальванических кругов с алмазным зерном при шлифовке керамических материалов состава  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Показано, что на скорость съема материала и получаемую шероховатость поверхности влияют размер зерна алмаза и толщина никелевой связки. Отмечено, что нагрузка при шлифовании является важнейшим фактором, определяющим производительность процесса удаления материала, качество поверхности и срок службы инструмента [10]. Значимость параметров алмазно-абразивного шлифования (материала заготовки,

формы абразива, температуры и глубины подачи) рассмотрена в работе [5] на микроуровне. В фундаментальных работах [12, 13] приведены результаты экспериментальных исследований и построен ряд феноменологических моделей для алмазных материалов с низкомодульными органическими и металлическими матрицами при обработке на конкретном оборудовании. Показано, что многие характеристики изнашивания инструмента и детали имеют неоднозначные тенденции изменения в зависимости от экспериментального оборудования и жесткости системы.

Однако в большинстве исследований рассмотрены инструментальные алмазно-абразивные материалы с мягкими связками. Оценке работоспособности алмазных инструментов с твердыми керамическими матрицами посвящено значительно меньше работ [7, 9], что обусловлено сложностями технологии встраивания дисперсных частиц алмаза в тугоплавкую керамическую матрицу. Результатов исследований абразивного фрикционного взаимодействия алмазосодержащих материалов с керамическими матрицами и твердых керамических деталей недостаточно для разработки высокоеффективных инструментов и выбора режимов обработки.

Авторами разработан алмазосодержащий материал с керамической матрицей из оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который показал высокие режущие свойства и хорошее алмазоудержание [15–17]. Инструмент из такого материала показал производительность шлифования в 2–5 раз выше, чем у инструментов с традиционными связками, и способность эффективно изнашивать деталь в течение длительного времени без необходимости в правке режущей поверхности. Установлено, что взаимодействие алмазосодержащего керамического материала (АКМ) и керамической обрабатываемой поверхности в режиме устойчивой эксплуатации абразивного инструмента носит упругий характер.

Для дальнейшего развития исследований в этом направлении необходимо экспериментально и теоретически проанализировать влияние структурных и динамических параметров алмазно-абразивной обработки на изнашивание фрикционной системы «алмазосодержащий инструмент с керамической матрицей – керамическая деталь», ранжировать степень влияния этих параметров. Построение инженерной модели влияния параметров абразивной обработки позволит определить рациональные технологические решения, направленные на повышение эффективности прецизионной обработки твердых керамических материалов.

Цель работы – выявить факторы, наиболее существенно влияющие на работоспособность АКМ, и определить их рациональные значения.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Абразивные инструменты изготавливались в виде дисков толщиной 0,6 см с диаметрами: наружным – 5 см, внутренним – 2 см. Для изготовления образцов абразивных инструментов использовались синтетические алмазы марки АС6 зернистостью  $d$  100/80 и 63/50. Материалом связки для основных испытуемых материалов была керамическая матрица, состоящая из оксидов алюминия.

Для сопоставления получаемых результатов были изготовлены абразивные алмазные инструменты с традиционно применяемыми металлической (М1) и органической бакелитовой (Б1) связками. Исследовались режимы шлифования электротехнической керамики  $\text{BaO}\text{-}\text{SiO}_2\text{-}\text{Al}_2\text{O}_3$  твердостью 16 ГПа, обработка велась в присутствии смазочно-охлаждающей жидкости (техническая вода) при линейной скорости скольжения 30 м/с.

Абразивные инструменты из алмазосодержащей керамики изготавливались путем прессования алюминиевого порошка и дисперсных алмазов в вакууме с последующим спеканием при температуре 570...575 °С в течение 30...40 мин [16]. Для защиты от чрезмерной неконтролируемой графитизации в процессе формирования материала зерна алмаза предварительно подвергались меднению. Непосредственно режущий абразивный слой формировался электролитическим оксидированием на поверхности дисковой заготовки (рис. 1). Под действием микродуговых разрядов алюминиевая связка преобразовывалась в матрицу из оксидов алюминия  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -модификаций, в которой равномерно по объему распределялись жестко фиксированные дисперсные алмазы. Образцы с дисперсностью алмаза 63/50 были изготовлены с объемной плотностью зерен  $\tau = 37,5; 25; 18,75$  и  $12,5\%$ , что соответствует 150, 100, 75 и 50 % концентрации алмаза К (за 100%-ю концентрацию алмаза в материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 карата в 1 см<sup>3</sup>) [7].

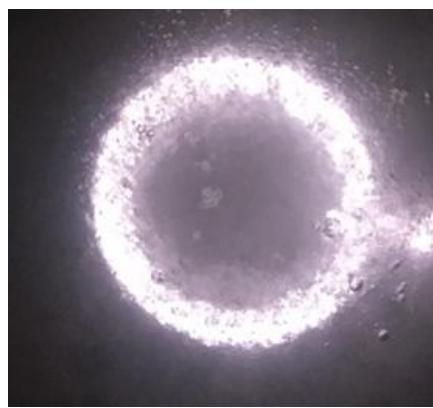


Рис. 1. Процесс электролитического формирования алмазного керамического покрытия

Фрикционные испытания проводились на машине трения МТ-2 [16]. Для оценки параметров микрогеометрии поверхностей трения применялись стандартные методы профилометрии ГОСТ 19300-86 [18], анализ микроструктуры выполнялся с использованием металлографического микроскопа. Микропрочность оценивали с помощью микротвердомера ПМТ-3, в качестве индентора выступала пирамида Виккерса.

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

При аналитическом выявлении факторов, влияющих на работоспособность алмазосодержащих керамических материалов, а также при расчете фрикционных параметров в зависимости от давления, концентрации и зернистости алмазов, микрогеометрии инструмента и обрабатываемой детали будем использовать основное уравнение изнашивания [19, 20]. В полученные соотношения должны также входить физико-механические свойства пары материалов «инструмент – деталь».

Будем исходить из предположения, что основной характер деформирования микронеровностей в установившемся режиме абразивного износа является линейно-упругим. Хрупкое разрушение обрабатываемой поверхности происходит при нагрузке, превышающей среднее упругое давление на пятне контакта, равное микропрочности материала  $\sigma$  [21]. Микропрочность соответствует напряжению, необходимому для

образования единицы площади хрупкого разрушения. Принимая, что размер алмазных зерен сопоставим с микронеровностями матрицы, моделируем поверхность композиционного материала в виде сферических сегментов одинакового радиуса  $R$ . Учитывая, что нагрузка в зоне контакта воспринимается как неровностями матрицы, так и выступающими зернами алмаза, и применяя для определения характеристик упругого контакта единичных сферических неровностей формулы Герца [22], получим упругое сближение контактирующих поверхностей в виде

$$a_y = Rp \left[ \frac{1,5\pi q_a I_e}{tmv(v-1)K_3} \left( \frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{v+0,5}}, \quad (1)$$

где  $Rp$ ,  $tm$ ,  $v$  – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [20, 23];

$q_a$  – номинальное давление в контакте;

$I_e = \left( \frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$  – эквивалентная упругая постоянная;

$I_a = \frac{1-\mu_a^2}{E_a} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$ ,  $I_c = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$  – упругие постоянные контакта алмаз – контробразец, связка – контробразец;

$E_a$ ,  $E_c$ ,  $E_k$  – модули упругости материалов алмаза, матрицы и контробразца;

$\mu_a$ ,  $\mu_c$ ,  $\mu_k$  – коэффициенты Пуассона материалов алмаза, керамической связки и контробразца;

$K_3$  – коэффициент, характеризующий опорную кривую [23].

Затем, распространив решение на множественный контакт шероховатых поверхностей, получим критическое номинальное давление  $q_{ax}$  в зависимости от физико-механических констант материалов и параметров профиля поверхностей трения:

$$q_{ax} = \left( \frac{tmv\sigma}{2} \right)^{2v+1} \times \left[ \frac{1,5\pi I_e}{tmv(v-1)K_3} \left( \frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{2v}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – микропрочность материала.

Исходя из предположения, что глубина шлифования минералокерамическим алмазосодержащим материалом обрабатываемой керамической поверхности равна величине упругого внедрения зерна [19, 20], и учитывая, что абразивное формообразование пары «инструмент – деталь» определяется суммарным объемом внедрившихся неровностей, получим формулу для расчета производительности шлифования

$$Q_t = \frac{SvtmRp}{2(v+1)n} \left[ \frac{1,5\pi q_a I_e}{tmv(v-1)K_3} \left( \frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \frac{I_k}{I_e}, \quad (3)$$

где  $S$  – ширина зоны износа;

$v$  – скорость взаимного перемещения инструмента и детали;

$n$  – число циклов, приводящих к отделению частиц износа. В случае абразивного изнашивания керамического материала  $n = 1$  [19, 20];

$$I_k = \frac{1-\mu_k^2}{E_k}.$$

Учитывая объемную плотность содержания алмазов в материале, выразим содержание алмазов в изношенном слое абразивного инструмента  $m_a$  за время шлифования  $t$ :

$$m_a = \frac{8,78 \cdot K S v t R p t m}{2(v+1)n} \left[ \frac{1,5 \pi q_a I_e}{t m v (v-1) K_3} \left( \frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \left[ \frac{I_{ac}}{I_e} \right], \quad (4)$$

где  $I_{ac} = \frac{\tau(1-\mu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\tau)(1-\mu_c^2)}{E_c}$ .

Введем величину удельного расхода алмазов  $q_V$  (отношение массы алмазов в изношенном абразивном слое к массе материала контробразца, сошлифованного за испытание) как характеристику износа алмазосодержащих абразивных инструментов:

$$q_V = 8,78 K \left[ \frac{I_{ac}}{I_e} \right]. \quad (5)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Влияние давления на производительность шлифования и расход алмазов.

Результаты экспериментов показали, что производительность шлифования прямо пропорциональна давлению (рис. 2), так как повышение нагрузки ведет к увеличению глубины внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал и, следовательно, к увеличению объема удаляемого за единицу времени материала для всех испытуемых образцов.

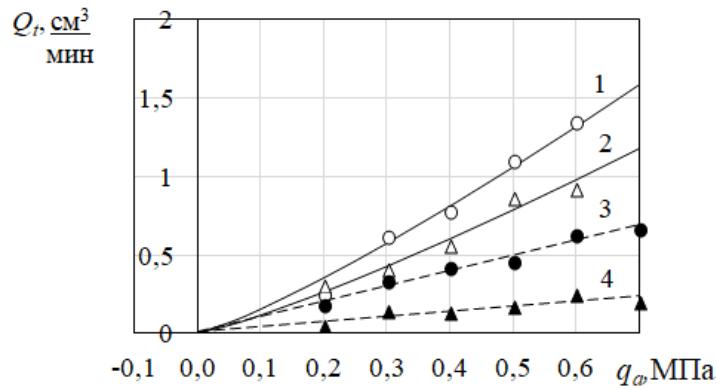


Рис. 2. Влияние давления  $q_a$  на производительность шлифования  $Q_t$ :  
1 – АКМ, сплошные линии – расчет по формуле (3), точки – результаты эксперимента,  $d = 100/80$ ; 2 – АКМ,  $d = 63/50$ ; 3 – М1,  $d = 63/50$ ; 4 – Б1,  $d = 63/50$

Согласно формуле (3)  $Q_t \sim q_a^{\frac{v+1}{v+0,5}}$  в степени несколько больше 1. Однако вопрос о предельно допустимом давлении сложен и должен решаться с учетом конкретных условий шлифования. Так, для широкого класса деталей из титаносодержащей керамики, имеющих толщину менее 0,05 мм, ограничением является их невысокая прочность: при превышении критического давления 0,05 МПа они растрескиваются [12]. При предварительной обработке более толстых заготовок, которые часто имеют коробления с неплоскостью более 0,5 мм, имеется опасность срыва их

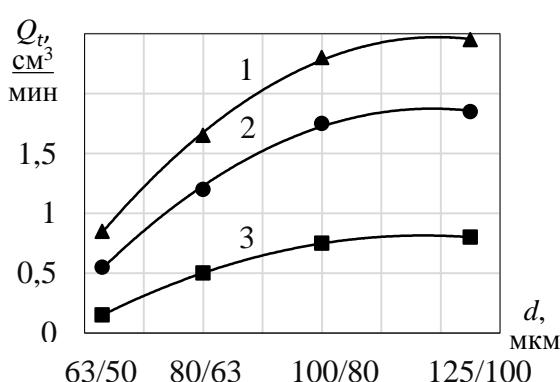
тангенциальными силами или откалывания кусков, не прилегающих к поверхности стола нормальной силой. При шлифовании пластин, имеющих неплоскость опорной поверхности менее 0,2 мм, срыв наблюдается при давлении 0,4 МПа. Кроме того, у многих шлифовальных станков шпиндель останавливается при превышении нагрузки 110...150 Н в зависимости от марки алмазного круга.

Таким образом, для шлифования с высокой производительностью необходимо стремиться к увеличению давления в пределах, ограниченных прочностью детали или возможностью станка.

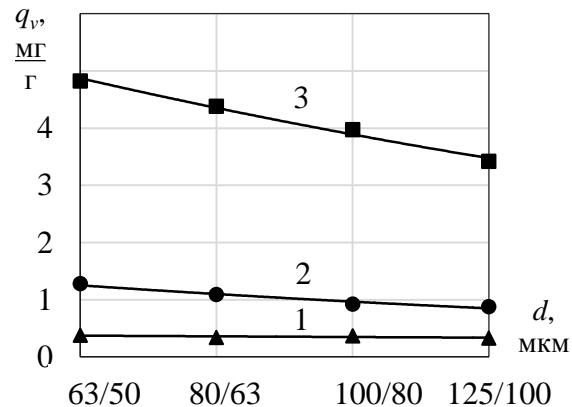
Величина критического давления, рассчитанная по формуле (2), в 1,35...2,68 раза ниже рекомендуемого давления при шлифовании керамики. Расчет, проведенный для черновой и чистовой обработки титаносодержащей и оксидной керамики, показал, что данное выражение может быть использовано для определения нижней границы давлений, так как при меньших давлениях шлифование невозможно.

Расход алмазов в изношенном слое абразивного инструмента  $m_a \sim q_a^{\frac{v+1}{v+0,5}}$ , т.е. возрастает аналогично производительности шлифования, практически прямо пропорционально давлению (формула (3)). Однако удельный расход алмазов  $q_v$ , согласно формуле (5), не зависит от давления при обработке твердых керамических материалов, поскольку с увеличением давления производительность шлифования керамической детали и объем изношенного абразивного керамического инструмента прямо пропорциональны и определяются только соотношением упругих свойств контактирующих материалов.

**2. Влияние зернистости на производительность шлифования и расход алмазов.** Зернистость алмазов в кругах является одним из наиболее сильно-действующих факторов, определяющих производительность шлифования керамики. Как показали экспериментальные исследования, с увеличением зернистости производительность шлифования растет сначала прямо пропорционально, а затем постепенно стремится к насыщению (рис. 3).



(а)



(б)

Рис. 3. Влияние зернистости  $d$  на производительность шлифования  $Q_t$  (а) и удельный расход алмазов  $q_v$  (б): 1 – АКМ; 2 – М1; 3 – Б1 (К – 100 %)

В работе [12] отмечено, что в некоторых случаях эта зависимость имеет экстремальный вид. Таким образом, при увеличении зернистости производительность увеличивается до насыщения, что полностью соответствует соотношению (3). Анализируя формулу (3), можно сказать, что влияние зернистости на произво-

дительность шлифования определяется комплексом:  $(d)^{\frac{v+1}{2v+1}}$ . Соответственно, в зависимости от вида обработки поверхности, учитывая типичные значения  $v$  [23], получим:

$$\begin{cases} Q_t \sim d^{0,8} & \text{шлифование} \\ Q_t \sim d^{0,6} & \text{фрезерование, полирование.} \end{cases} \quad (6)$$

Эксперименты показали, что удельный расход алмазов абразивного круга из АКМ практически не зависит от размера алмазных зерен (рис. 5б), что можно считать подтверждением формулы (5). У материалов с традиционными матрицами при увеличении зернистости расход алмазов значительно снижается.

**3. Влияние концентрации алмазов на производительность шлифования и износ инструмента.** При увеличении концентрации алмазов производительность шлифования снижается для образцов со связками М1 и Б1. У образца из АКМ  $Q_t$  практически не изменяется во всем исследуемом диапазоне концентраций (рис. 4). При увеличении  $K$  возрастает число алмазных выступов, непосредственно участвующих в контактном взаимодействии, соответственно, нагрузка, приходящаяся на одно зерно, снижается, как и глубина его внедрения в обрабатываемую поверхность. Как следствие, объем сошлифованного материала не изменяется. Для абразивных инструментов с мягкими матрицами при увеличении концентрации затрудняется удаление частиц износа из зоны контакта, глубина резания уменьшается и производительность шлифования снижается. Алмазосодержащие керамические материалы не подвержены засаливанию, поэтому  $Q_t$  для них не зависит от концентрации. Теоретически концентрация алмазов влияет на  $Q_t$  опосредованно, через упругие постоянные композиционного материала и обрабатываемой детали (формула (3)).

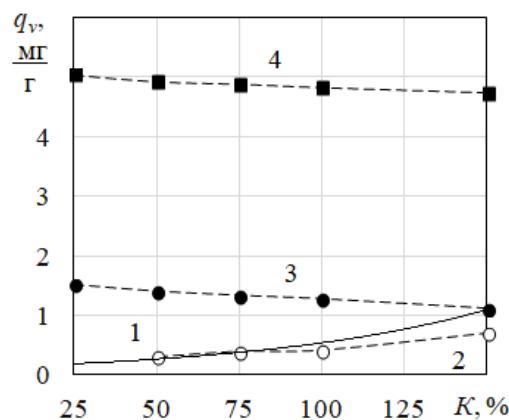


Рис. 4. Влияние концентрации алмазов  $K$  на удельный расход  $q_V$ :  
 $q_a = 0,5 \text{ МПа}, d = 63/50$ : 1 – расчет по формуле (5); 2 – результаты эксперимента АКМ;  
3 – матрица М1; 4 – матрица Б1

Эксперименты показали, что влияние концентрации алмазов на относительную износостойкость (удельный расход алмазов) зависит от вида связки. При использовании более мягких матриц удельный расход алмазов снижается с увеличением концентрации, а у АКМ возрастает. Для кругов с керамическими связками данный результат можно объяснить снижением прочности композиционного материала при увеличении концентрации алмазов и отсутствием засаливания режущих

поверхностей. У традиционных, более мягких матриц под действием нагрузки, температуры и значительно хуже удаляемых продуктов износа алмазы как бы заполировываются в режущую поверхность.

Полученная зависимость  $q_V$  от концентрации носит степенной характер, так как  $K(\tau)$  определяет упругую постоянную АКМ (формула (1)). Теоретические и экспериментальные результаты оценки удельного расхода алмазов для АКМ имеют схожие тенденции изменения.

В работе [13] установлено, что влияние концентрации на работоспособность абразивных алмазосодержащих материалов неоднозначно: большое значение имеют жесткость системы «абразивный инструмент – обрабатываемая деталь» и интенсивность износа режущей поверхности. Однаковая пара испытуемых материалов в зависимости от модификации станка, условий нагружения и подачи показывала отличающиеся тенденции (возрастание/убывание) изменения  $Q_t$  и  $q_V$ .

**4. Оценка шероховатости обрабатываемой поверхности детали.** Анализ изменения морфологии поверхности контробразца показал, что в наибольшей степени она определяется зернистостью абразивного инструмента: с возрастанием зернистости алмазов шероховатость обрабатываемой детали растет независимо от материалов связки [24]. С учетом влияния концентрации алмазов в инструменте и соотношения микротвердостей материалов матрицы и контробразца получим эмпирическую формулу для оценки шероховатости поверхности детали:

$$Ra = 8,81 \cdot 10^{-19} \cdot d^4 \cdot H_M^{0,67} \cdot H_K^{0,54} \cdot \left( \frac{10^{-4}\tau^2 + 1,25}{10^{-4}\tau^2 + 1} \right), \quad (7)$$

где  $d$  – зернистость алмазов (нижняя фракция) в АКМ, мкм;

$H_M$  и  $H_K$  – микротвердость материалов матрицы и контробразца соответственно, Па.

Установлено, что нагрузка на абразивный инструмент практически не влияет на шероховатость получаемой поверхности керамической детали. Скорость вращения абразивного инструмента влияет опосредованно, через изменение физико-механических характеристик взаимодействующих поверхностей (рассмотрено ниже). В целом с увеличением скорости скольжения (частоты вращения) инструмента шероховатость поверхности образца снижается. Профиль поверхности абразивного АКМ практически не изменяется в процессе эксплуатации [24].

**5. Оценка глубины шлифования.** При высоком давлении на контакте  $q_a$ , когда зерна алмаза погружаются на полную высоту выступающей части, матрица соприкасается с обрабатываемым материалом. При этом зерна испытывают большую перегрузку, интенсивно разрушаются и притупляются. Из-за медленного истирания матрицы новые зерна не успевают обнажаться, и, если не происходит сильного нагрева, поверхность заполированывается. При сильном нагреве обрабатываемый материал размягчается и забивает промежутки между зернами, препятствуя истиранию матрицы. В этом случае инструмент засаливается.

При благоприятном режиме работы инструмента обрабатываемая поверхность непосредственно не контактирует с матрицей, между ними остается пространство, которое непрерывно заполняется стружкой, вымыываемой смазочно-охлаждающей жидкостью. Стружка проходит по матрице и в результате абразивного действия истирает ее. Новые зерна своевременно обнажаются, обеспечивая устойчивую работоспособность инструмента. Это наиболее благоприятный режим для работы алмазных зерен и инструмента в целом. Установлено, что для создания таких условий необходим режим работы инструмента, при котором отношение между глубиной

врезания и средним размером зерна находится в пределах 0,12...0,15. Учитывая, что глубина шлифования равна величине упругого внедрения зерна  $a_y$  (формула (1)), отношение  $a_y$  к зернистости круга  $d$  должно составлять около 0,135.

**6. Оценка влияния дополнительных факторов.** Прочность алмазосодержащего материала снижается с увеличением концентрации алмазов, уменьшением зернистости и шероховатости поверхности алмазного зерна. Снижение прочности при увеличении концентрации алмазов и их дисперсности не позволяет изготавливать АКМ с концентрацией выше 150, что соответствует 37 % объема. Кроме того, одновременное увеличение концентрации и дисперсности алмазов до 10...15 мкм более интенсивно снижает прочность, и, следовательно, оптимальные концентрации алмазов  $K$  не должны превышать 50...100.

Для шлифования керамики чаще всего применяют круги с марками алмазов АСР, АСН и АСВ. Установлено, что в широком диапазоне условий шлифования режущая способность кругов с алмазными зернами АСР и АСВ практически одинакова. По-видимому, это объясняется тем, что зерна АСР, как более шероховатые, образуют рабочую поверхность круга с большим количеством элементов, но внедряются они в заготовку на меньшую глубину, чем меньшее количество зерен АСВ. Удаленные объемы материала от большего числа мелких царапин и меньшего числа более глубоких царапин примерно равны. Данный вывод подтверждается результатами профилирования поверхности обрабатываемой керамики.

В рамках данного исследования натурные скоростные фрикционные испытания не проводились. Согласно теоретической модели производительность шлифования прямо пропорциональна скорости. В работе [7] показана прямо пропорциональная или степенная зависимость от скорости. Авторы [12] отмечают, что в некоторых случаях при увеличении скорости обработки производительность шлифования приобретает экстремальный характер. Однако круги из АКМ имеют вероятность разрыва центробежными силами на повышенных скоростях обработки, что не гарантирует безопасность работ. Многие изготовители алмазного инструмента ограничивают рекомендуемые скорости величиной 15...30 м/с. В указанном диапазоне скорость несущественно влияет на производительность шлифования, поэтому данный фактор можно не принимать во внимание.

При скоростях скольжения менее 30 м/с и хорошей подаче смазочно-охлаждающей жидкости можно пренебречь неконтролируемой графитизацией алмазных зерен. Изменение физико-механических свойств материалов контактирующих поверхностей вследствие фрикционного разогрева носит локальный характер. Для АКМ, имеющих тугоплавкую керамическую матрицу из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , влияние повышения температуры менее существенно, чем для алмазных инструментов с металлическими или органическими связками. Кроме того, алюминиевая подложка АКМ хорошо отводит тепло.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При высокоэффективном шлифовании керамики алмазосодержащими инструментами с керамическими матрицами определяющими факторами являются нагрузка на инструмент, его зернистость и концентрация алмазов, физико-механические свойства взаимодействующих материалов, глубина подачи.

При увеличении давления производительность шлифования АКМ и расход алмазов в изношенном слое абразивного инструмента возрастают пропорционально давлению  $Q_t \sim q_a^{1,2} \dots q_a^{1,3}$  в зависимости от вида шлифования. Удельный расход алмазов не зависит от давления при обработке твердых керамических материалов.

При увеличении зернистости производительность шлифования растет, а затем постепенно стремится к насыщению:  $Q_t \sim d^{0,6} \dots d^{0,8}$ . Удельный расход алмазов абразивного круга из АКМ практически не зависит от размера алмазных зерен, в отличие от традиционных материалов, для которых  $q_V$  снижается с ростом зернистости.

Влияние концентрации алмазов на производительность шлифования и расход алмазов зависит от механических свойств матрицы, обрабатываемой детали и жесткости системы «абразивный инструмент – обрабатываемая деталь». При изготовлении инструментов из АКМ производительность шлифования не изменяется в диапазоне  $K = 25 \dots 150 \%$ . По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что удельный расход алмазов АКМ возрастает с увеличением зернистости.

Шероховатость поверхности детали в основном определяется зернистостью абразивного инструмента, концентрацией зерен алмаза, соотношением твердости материалов связки и детали.

Рассмотрены предпочтительные диапазоны глубины шлифования, скоростей скольжения системы «инструмент – деталь», оценены марки алмазов. Инструменты из алмазосодержащего материала с керамической связкой рекомендуется применять для прецизионной обработки керамических деталей и минералов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wang J., Huang G. Review on manufacturing diamond abrasive tools by additive manufacturing technology // *Diamond and Abrasives Engineering*. 2022. V. 42. № 3. P. 307–316.
2. Pandiyan V., Caesarendra W., Tjahjowidodo T., Tan H.H. In-process tool condition monitoring in compliant abrasive belt grinding process using support vector machine and genetic algorithm // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. V. 31. P. 199–213.
3. Deja M., Zieliński D. Wear of electroplated diamond tools in lap-grinding of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic materials // *Wear*. 2020. V. 460. P. 203461.
4. Young C., Blunt L., Tong Z. Development of an ultra-precision grinding technique for the production of structured micro-patches on ceramics and tool steel // *In Proceedings of the 17th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN*. 2017. P. 207–208.
5. Eder S.J., Grützmacher P.G., Spenger T., Heckes H., Rojac H., Nevosad A., Haas F. Experimentally validated atomistic simulation of the effect of relevant grinding parameters on work piece topography, internal stresses, and microstructure // *Friction*. 2022. V. 10. № 4. P. 608–629.
6. Kalita K., Chakraborty S., Ghadai R.K., Chakraborty S. Parametric optimization of non-traditional machining processes using multi-criteria decision making techniques: literature review and future directions. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design // *Springer Science and Business Media*. 2023. V. 6. P. 1–40.
7. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокомпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
8. Shenderova O., Gruen D.M. Ultrananocrystalline Diamond: Synthesis, Properties, and Applications. Elsevier Inc, 2006. 600 p.
9. Витязь П.А., Судник Л.В., Бойко А.А. Алмазосодержащая керамика для абразивной обработки. Минск: Бестпринт, 2004. 196 с.
10. Li L., Zhang Y., Cui X., Said Z., Sharma S., Liu M. Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis // *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. V. 102. P. 921–954.

11. Fedorovich V., Pyzhov I., Ostroverkh Y. Methodology of definition of optimal diamond wheel characteristics at stages of production and operation // *Cutting & Tools in Technological System*. 2022. V. 96. P. 42–51.
12. Ваксер Д.В., Иванов В.А., Никитков Н.В., Рабинович В.Б. Алмазная обработка технической керамики. Л.: Машиностроение, 1976. 160 с.
13. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 263 с.
14. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.
15. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
16. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
17. Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В. Моделирование износа пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика» // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 299–304.
18. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1996. 10 с.
19. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
20. Чичинадзе, А.В. Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ, смазка (трибология и триботехника). М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
21. Пушкарев О.И., Кулик О.Г., Никуйко Л.А. Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 49–52.
22. Johnson K.L. *Contact mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 452 p.
23. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
24. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние структуры минералокерамического абразивного материала на эксплуатационные параметры и морфологию обрабатываемой поверхности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 5–14.

**Для цитирования:** Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Прецизионная алмазно-абразивная обработка керамических материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 23–34.

## **PRECISION DIAMOND-ABRASIVE PROCESSING OF CERAMIC MATERIALS**

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.,  
O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: onvk@mail.ru

The influence of load-speed wear conditions and the structural composition of ceramic diamond material on the grinding performance and consumption of abrasive tools is investigated. It is established that the determining factors are the load on the tool, its grain size and diamond concentration, the physical and mechanical properties of interacting materials, and the feed depth. The ratios of abrasive wear parameters depending on the type of grinding were obtained. Practical recommendations are given on the selection of ranges of grain size, diamond concentration, grinding depth, and processing speed. The diamond grades are evaluated.

*Keywords:* precision machining, grinding performance, diamond consumption, grinding modes, diamond-abrasive processing, ceramic binder.

Поступила в редакцию/received: 10.03.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;  
принята/accepted: 19.03.2025

УДК 621.791.92

## **АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО НАПЛАВЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ**

М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е., 2025

Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной износостойкости покрытий, сформированных плазменно-порошковой наплавкой на различных токах дуги. Использовался порошок хромоникелевого сплава марки Colmonoy 315-P2. Лабораторные испытания на изнашивание о закрепленный абразив выявили значительную неоднородность износостойкости исследуемых никелевых наплавок, что может свидетельствовать о неоднородных механических свойствах и структуре поверхностного слоя наплавленного материала. По величине износостойкости исследованные покрытия относятся к 6-му классу, что можно признать средним результатом.

*Ключевые слова:* плазменная порошковая наплавка, хромоникелевый сплав, абразивная износостойкость, твердость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-34-41**