

ОБРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ АБРАЗИВНЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

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

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: onvk@mail.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2024

В работе исследованы триботехнические характеристики инструмента из композиционного материала, представляющего собой керамическую матрицу из оксида алюминия, упрочненную микродисперсными зёрнами алмазов. На основе классического подхода к деформированию шероховатых поверхностей построена модель, позволяющая оценить влияние структурных компонентов инструмента из алмазного минералокерамического материала на износ технической керамики. Получены соотношения для расчета производительности шлифования, содержания алмазов в изношенном слое абразивного инструмента и величины удельного расхода алмазов. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы. Установлено, что наибольшее влияние на производительность шлифования оказывают зернистость алмазов, нагрузочно-скоростные режимы. Отмечено, что концентрация алмазов существенно определяет относительную износостойкость абразивного инструмента. Полученные соотношения будут полезны при проектировании алмазосодержащих инструментов для обработки технической керамики.

Ключевые слова: абразивный алмазный инструмент, алмазная минералокерамика, обработка керамики, модель контактного взаимодействия, производительность шлифования, износ алмазного инструмента.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-13-21

ВВЕДЕНИЕ

Область применения технической керамики традиционно очень широка. Ее используют в качестве конструкционных материалов в машиностроении, приборостроении, авто- и авиастроении, в электротехнической промышленности и вычислительной технике и др. [1, 2]. Благодаря высокой твердости, износостойкости, термостойкости, керамику успешно применяют в узлах трения и для изготовления абразивного, твердосплавного инструмента. Однако эти же уникальные свойства определяют сложность обработки керамических материалов до стадии получения готового изделия. Формообразование материалов данного типа возможно осуществить только более твердым керамическим или алмазосодержащим инструментом [1–3].

Разработанная нами технология получения алмазосодержащего минералокерамического материала позволила синтезировать инструментальный композит, соединяющий режущие свойства алмаза и керамической матрицы из оксида алюминия [4–6]. Полученный материал показал более высокую производительность (в 1,3...3,3 раза) при обработке технической керамики по сравнению с традиционными алмазосодержащими инструментами с металлической и органической связками [5]. Изнашивание керамическим алмазным инструментом происходит настолько быстро,

что сложно зафиксировать требуемые геометрические размеры изделия и прекратить обработку. Композит характеризуется близкими механическими свойствами алмаза и керамической связки, высоким алмазодержанием, способностью сопротивляться деформированию при повышенных температурах. Технология получения алмазосодержащего композита предполагает варьирование структурными компонентами: зернистостью, концентрацией алмаза, степенью его графитизации и металлизации и др. Повысить эксплуатационные параметры алмазного керамического инструмента можно, если связать физико-механические свойства его составляющих со свойствами обрабатываемой керамики и нагрузочно-скоростными условиями резания. Фактически это означает спроектировать состав алмазосодержащего минерало-керамического материала под обработку конкретной технической керамики.

При анализе механики разрушения алмазосодержащего композита было проведено исследование морфологии рабочей поверхности инструмента после изнашивания, которое показало отсутствие следов абразивного износа и признаков «засаливания» режущих кромок алмазов. Установлено, что материал работает в режиме самозатачивания: изношенные алмазные зерна выкрашиваются вместе с частью окружающей их керамической матрицы, обнажая новый режущий слой. По результатам экспериментов можно предположить, что контакт алмазосодержащего минералокерамического материала с обрабатываемой керамической поверхностью носит упругий характер, а при возрастании нагрузки сопровождается последующим хрупким разрушением вершин микронеровностей.

Теоретическому моделированию изнашивания керамических материалов уделено достаточно большое внимание [7–10]. Наиболее распространенными теоретическими подходами в настоящее время являются линейная механика упругого разрушения и статистика Вейбулла [7, 11, 12]. Природа износа алмазосодержащих материалов с керамической матрицей изучена менее подробно. Сложность задачи заключается в эмерджентном соединении физико-механических свойств структурных компонентов композиционного материала [2, 13–15].

Авторы, экспериментально исследовавшие абразивный износ алмазосодержащих керамических материалов, подчеркивают, что они разрушаются хрупко, без заметных следов пластической деформации, в отличие от алмазосодержащих материалов с менее твердыми матрицами. В работе [2] получены данные об инвариантном линейно-упругом характере износа абразивных алмазосодержащих керамических инструментов.

Больше исследований посвящено алмазосодержащим материалам с традиционными матрицами: органической, металлической [2, 16]. В этих случаях при построении модели контактного взаимодействия «абразивный инструмент – деталь» рекомендуется использовать математические модели упругого, хрупкого, упругопластического контакта (последний определяется нагрузочно-скоростными режимами обработки). Но даже при применении низкомолекулярных связей (по сравнению с керамикой) авторы подчеркивают, что наиболее типичным и предпочтительным механизмом взаимодействия для устойчивой эксплуатации абразивного инструмента является упругое взаимодействие. Кроме того, известные математические модели не учитывают физико-механические свойства всех структурных элементов композиционных материалов, их размеры и микрогеометрические параметры контактирующих поверхностей. Модели износа часто опираются на эмпирические коэффициенты, и в них не берется в расчет специфика абразивного изнашивания именно керамики [7–16].

Цель работы – провести анализ влияния структурных компонентов инструмента из алмазного минералокерамического материала и нагрузочно-скоростных режимов обработки на износ технической керамики.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При расчете фрикционных параметров будем использовать основное уравнение изнашивания [17, 18]. В модели должны быть учтены физико-механические свойства пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика», их микрогеометрия и условия нагружения. Предположим, что контакт микронеровностей на поверхностях трения абразивных алмазосодержащих керамических инструментов носит линейно-упругий характер.

Рассмотрим контактное взаимодействие шероховатой поверхности упругого изнашиваемого керамического контробразца и упругого шероховатого полупространства, представляющего собой керамическую матрицу с распределенными в ней дисперсными зёрнами алмазов и перемещающегося по названной поверхности (рис. 1). Поверхность композиционного материала будем моделировать набором сферических сегментов одинакового радиуса R , зёрна алмаза распределены в материале с объёмной плотностью τ . Используем понятие эквивалентной поверхности [17], вершины микронеровностей которой распределены по степенному закону таким образом, чтобы распределение материала в поверхностном слое модели и реальной поверхности описывалось одинаковой опорной кривой. Для описания характеристик контакта единичной микронеровности применим формулы Герца [19], учитывая значительную толщину керамического алмазосодержащего слоя, сформированного на поверхности алюминиевой основы. Принимая во внимание, что в большинстве реальных трибосопряжений плотность контакта мала, взаимным влиянием микронеровностей можно пренебречь [18].

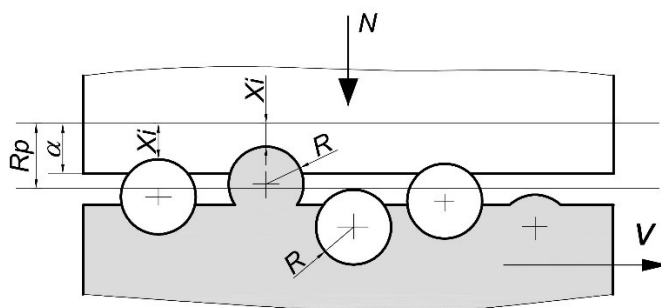


Рис. 1. Схема контакта шероховатого композиционного полупространства и поверхности керамического контробразца

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Приложенную нагрузку в зоне контакта N представим суммой сил, воспринимаемых зёрнами алмаза и микронеровностями матрицы:

$$N = \tau \int_0^a N_{i\text{ак}}(a_i) n'(x) dx + (1 - \tau) \int_0^a N_{i\text{ск}}(a_i) n'(x) dx, \quad (1)$$

где $N_{i\text{ак}}(a_i)$ и $N_{i\text{ск}}(a_i)$ – силы, действующие на единичное зерно алмаза и единичную микронеровность материала матрицы; $n'(x)$ – производная по x от функции распределения выступов.

Примем функцию распределения выступов в виде $n(x) = \frac{tmvA_a}{2\pi RRp^v} x^{v-1}$, где $n(x)$ – число выступов, вершины которых расположены выше уровня x , v ; Rp , tm – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [17, 18]; A_a – номинальная площадь контакта. Используя соотношения Герца для расчета характеристик упругого контакта единичных сферических неровностей и учитывая, что $a_i = a - x$, из уравнения (1) получим суммарную нагрузку в зоне контакта:

$$N = \frac{tmv(v-1)A_a a^{v+0,5} K_3}{1,5\pi R p^v} \left(\frac{\tau}{I_a} + \frac{(1-\tau)}{I_c} \right), \quad (2)$$

где K_3 – параметр шероховатости взаимодействующих поверхностей [17, 18]; $I_a = \frac{1-\mu_a^2}{E_a} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$; $I_c = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$ (E_a , E_c , E_k – модули упругости материалов алмаза, матрицы и контрообразца; μ_a , μ_c , μ_k – коэффициенты Пуассона материалов алмаза, матрицы и контрообразца). Из уравнения (2) выразим упругое сближение a шероховатой керамической матрицы с распределенными в ней дисперсными зёрнами алмазов и шероховатого керамического контрообразца:

$$a = Rp \left[\frac{1,5\pi q_a}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{v+0,5}} (I_3)^{\frac{1}{v+0,5}}, \quad (3)$$

где $q_a = \frac{N}{A_a}$ – номинальное давление в контакте, $I_3 = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная.

Положим, что абразивное формообразование взаимодействующих деталей определяет суммарный объем V внедрившихся неровностей:

$$V = V_1 + V_2,$$

где V_1 и V_2 – деформированный объем обрабатываемой детали и абразивного инструмента. Согласно источникам [17, 18],

$$V = \frac{A_r \cdot a}{v+1}, \quad (4)$$

$$A_r = 0,5tmA_a \left(\frac{a}{Rp} \right)^v, \quad (5)$$

где A_r – фактическая площадь контакта. Используя выражения (3)–(5), суммарный объем V внедрившихся неровностей можно выразить следующим образом:

$$V = \frac{A_a tmRp}{2(v+1)} \left[1,5 \frac{\pi q_a I_3}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}}. \quad (6)$$

Учитывая, что A_r для обеих поверхностей одинакова, а внедрение шероховатой поверхности a определяется внедрением единичных микронеровностей, можно записать:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{a_{i1}}{a_{i2}}.$$

Определив внедрение единичных микронеровностей из материалов детали a_{i1} и образца a_{i2} по теории Герца [19], для деформированных объемов получим:

$$V_1 = V \frac{I_k}{I_3}; \quad V_2 = V \frac{I_{ac}}{I_3}, \quad (7)$$

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

Исходя из того, что глубина шлифования минералокерамическим алмазосодержащим материалом керамической поверхности равна величине упругого внедрения зерна [18, 19], и используя выражения (6) и (7), получим уравнение для расчета производительности шлифования Q_t :

$$Q_t = \frac{SvtmRp}{2(v+1)n} \left[\frac{1,5\pi q_a I_3}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \frac{I_k}{I_3}, \quad (8)$$

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 $n = 1$ [17, 18].

Данное уравнение соответствует экспериментальным результатам, полученным в работе [1] при шлифовании алмазосодержащими композиционными керамическими материалами. Для алмазов зернистостью 100/80 мкм производительность шлифования прямо пропорциональна скорости взаимного перемещения инструмента и детали, а также давлению на контакте в степени 1, 2 (для характерного при алмазно-абразивной обработке керамики значения $v = 2$, по нашим данным, степень также равна 1, 2).

Учитывая, что за 100%-ю концентрацию алмаза K в алмазосодержащем материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 кар/см³, содержание алмазов m_a в изношенном слое абразивного инструмента за время шлифования t можно рассчитать по формуле

$$m_a = \frac{8,78 \cdot K S v t R p t m}{2(v+1)n} \left[\frac{1,5\pi q_a I_3}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \left[\frac{I_{ac}}{I_3} \right]. \quad (9)$$

Износ алмазосодержащих абразивных инструментов характеризуется величиной удельного расхода алмазов q_v , определяемой как отношение массы алмазов в изношенном абразивном слое к объему (массе) материала контрообразца, сошлифованного за испытание. Учитывая уравнения (7) и (9), получим

$$q_v = 8,78K \left[\frac{I_{ac}}{I_3} \right]. \quad (10)$$

При анализе абразивного износа в работах [17, 20] для широкого класса твердых материалов и минералов также подтверждается вывод о том, что относительная износостойкость пропорциональна только модулю упругости образцов. В нашей модели модуль упругости композиционного алмазосодержащего материала зависит также и от концентрации алмазных зерен.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Фрикционные испытания проводились на машине трения МТ-2 [21]. Реализована схема трения «палец – кольцо», в качестве смазки использована техническая вода. Оценивались производительность шлифования алмазосодержащим композитом контрообразца из электротехнической керамики (ультрафарфора) и износ непосредственно алмазного инструмента. Относительная погрешность результатов не превышала 12 %.

Анализ структуры режущей поверхности минералокерамического абразивного образца и морфологии обрабатываемой поверхности контрообразца проводился с помощью металлографического микроскопа и стандартных методов профилометрии (ГОСТ 19300-86) [22]. Внешний вид испытываемых образцов минералокерамических абразивных кругов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Испытываемые образцы минералокерамических абразивных кругов

На рис. 3а показано существенное влияние нагрузки в зоне трибоконтакта на производительность шлифования для выбранной пары материалов. Согласно формуле (8), производительность шлифования возрастает с увеличением давления. При увеличении зернистости алмазов Q_t возрастает теоретически (8) и по результатам испытаний (рис. 3а). Длительность стабильной работоспособности алмазосодержащего композита показана на рис. 3б. Установлено, что работоспособность инструмента практически не снижается за все время испытаний. Морфологический анализ поверхности трения алмазного абразивного инструмента подтвердил, что последний не подвержен засаливанию: изношенные зерна выкрашиваются с частью матрицы, своевременно обнажая нижележащие алмазы. При этом «изношенные» зерна не удаляются из зоны трения, а продолжают дополнительно изнашивать деталь. При применении алмазов большей зернистости производительность шлифования существенно больше, но характер зависимости не изменяется (рис. 3б, (8)).

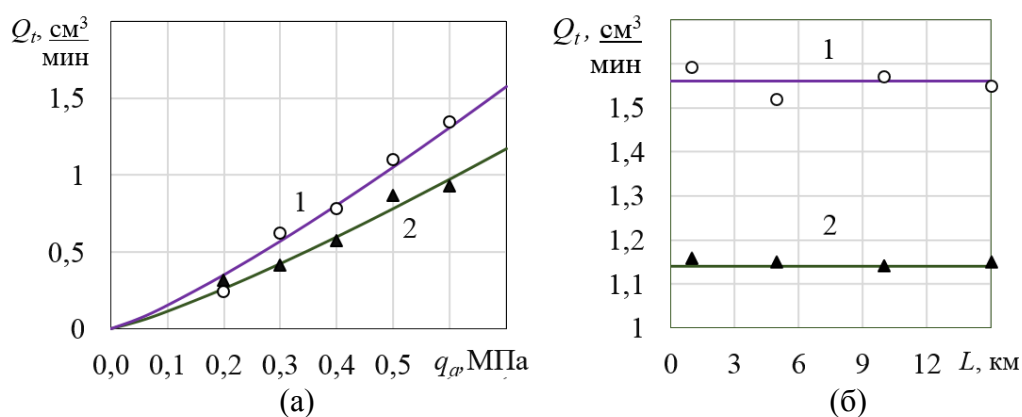


Рис. 3. Влияние давления q_a (а) и пути резания L (б) на производительность шлифования Q_t . Сплошные линии – расчет по формуле (8); точки – результаты эксперимента: 1 – $d = 100/80$; 2 – $d = 63/50$

В результате испытаний не зафиксировано существенного влияния концентрации зерен алмаза на производительность шлифования. Частично это объясняется близкими механическими свойствами алмазного зерна и корундовой матрицы. С увеличением количества контактирующих зерен алмаза снижается нагрузка на каждое отдельное зерно, а объем сошлифованного материала меняется незначительно. Кроме того, сыграло роль и то, что прочностные свойства обрабатываемой керамики в нашем эксперименте ниже алмазосодержащего абразива. При близких модулях упругости материалов алмаза, матрицы и контробразца влияние концентрации на упругие постоянные I_3 и I_{ac} более значительно.

Износ инструмента из алмазосодержащей минералокерамики оценивали по содержанию алмазов в изношенном алмазосодержащем слое (рис. 4а) и величине удельного расхода алмазов (рис. 4б). На рис. 4 показаны результаты расчетов по формулам (9) и (10) в сопоставлении с результатами эксперимента. Масса израсходованных алмазов возрастает при повышении нагрузки, зернистости и концентрации зерен, при увеличении площади контакта «инструмент – деталь» (9). Концентрация алмазов существенно определяет относительную износостойкость (удельный расход алмазов). Зависимость не прямо пропорциональная, так как концентрация структурных элементов также определяет упругую постоянную композиционного материала. Теоретические и опытные параметры износа алмазного минералокерамического инструмента имеют схожие тенденции изменения, но погрешность данных испытаний несколько выше.

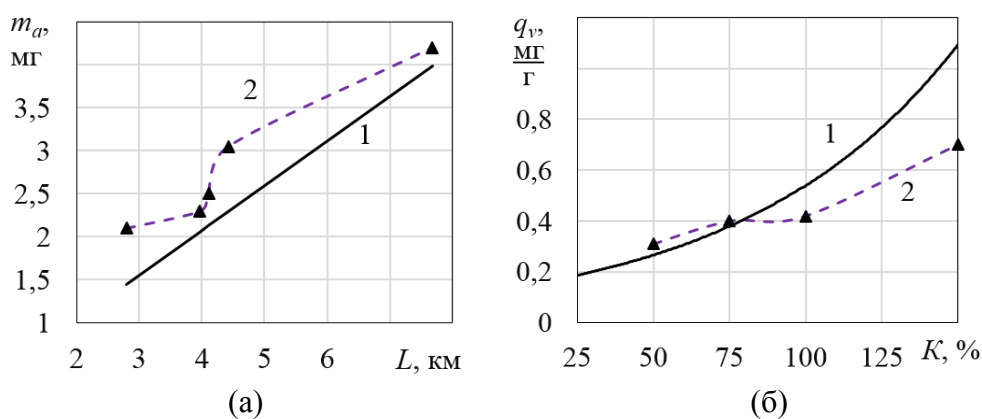


Рис. 4. Влияние пути резания L на содержание алмазов m_a в изношенном слое абразивного инструмента (а) и концентрации алмазов K на удельный расход алмазов q_v (б):
1 – расчет по формулам (9) и (10);
2 – результаты эксперимента ($q_a = 0,5$ МПа; $d = 63/50$; $K = 150$ %)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была установлена связь между характеристиками структурных компонентов алмазосодержащего керамического абразивного инструмента и основными параметрами изнашивания при формообразовании детали из технической керамики. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правомерность выбранного метода расчета и принятых при этом допущений.

Установлено, что при увеличении скорости скольжения, приложенной нагрузки и зернистости алмаза возрастает износ керамической детали и алмазосодержащего

абразива: увеличивается производительность шлифования керамики, растет содержание алмазов в изношенном слое абразивного инструмента. Концентрация алмазов не оказала существенного влияния на данные характеристики. Удельный расход алмазов пропорционален концентрации алмазов и зависит от модуля упругости контактирующих материалов.

Полученные зависимости параметров износа технической керамики и алмазного минералокерамического инструмента позволяют на этапе проектирования материалов данного типа оптимизировать зернистость, концентрацию алмазов, нагрузочные и скоростные режимы эксплуатации инструмента с целью повышения параметров их работоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н. Обобщенные факторы для характеристики изнашивания технической керамики // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2004. № 3. С. 13–22.
2. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука. 2012. 319 с.
3. Rahaman M.N. *Ceramic Processing and Sintering*. Second Edition. CRC Press. 2017. 875 p.
4. 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.
5. 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.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 4. С. 30–37.
7. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Савинова Т.М. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 1. С. 22–28.
8. Sharma S.K., Kumar B.V.M., Kim Y.W. Tribological Behavior of Silicon Carbide Ceramics. A review // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2016. V. 53. P. 581–596.
9. Gogotsi Y.G., Koval'chenko A.M., Osipova I.I., Yaroshenko V.P. Wear Resistance of Si₃N₄-TiN Ceramics in its Friction against Diamond Abrasive // *Sverkhтвердые Materialy*. 1992. № 3. P. 20–25.
10. Wang Y., Hsu S.M. Wear and Wear Transition Mechanisms of Ceramics // *Wear*. 1996. V. 195. P. 112–122.
11. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: URSS. 2017. 544 с.
12. Ворович И.И., Александров В.М. Механика контактных взаимодействий. М.: Физматлит. 2001. 336 с.
13. Залеснов А.И., Петухов Е.Н., Аборкин А.В. Исследование механизма и разработка модели износа алмазного инструмента при тчении алюмоматричных композиционных материалов // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 5. С. 445–453.
14. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.

15. Fedorenko D.O., Fedorovich V.A., Fedorenko E.Yu., Daineko K.B. Ceramic-matrix composite materials for the diamond abrasive tools manufacture // *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*. 2017. V. 117. P. 212–224.
16. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. Киев: Наукова думка. 1978. 227 с.
17. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 526 с.
18. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ, смазка (трибология и триботехника). М.: Машиностроение. 2003. 576 с.
19. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage. 2001. 452 p.
20. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука. 1970. 252 с.
21. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Синтез композиционного керамического материала и исследование его абразивных свойств // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 22–31.
22. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1996. 10 с.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Обработка технической керамики абразивным алмазным инструментом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 13–21.

PROCESSING OF TECHNICAL CERAMICS WITH AN ABRASIVE DIAMOND TOOL

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

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

The work investigated the tribological characteristics of a tool made of a composite material, which is a ceramic matrix of aluminum oxide, strengthened with microdispersed diamond grains. Based on the classical approach to the deformation of rough surfaces, a model has been constructed that allows us to evaluate the influence of the structural components of a tool made of diamond mineral-ceramic material on the wear of technical ceramics. Relationships have been obtained for calculating grinding productivity, the diamond content in the worn layer of an abrasive tool, and the specific consumption of diamonds. The experimental studies carried out confirmed the theoretical conclusions. It has been established that the diamond grain size and load-speed conditions have the greatest influence on grinding performance. It is noted that the concentration of diamonds significantly determines the relative wear resistance of abrasive tools. The obtained relationships will be useful in the design of diamond-containing tools for processing technical ceramics.

Keywords: abrasive diamond tools, diamond mineral ceramics, ceramic processing, contact interaction model, grinding performance, wear of diamond tools.

Поступила в редакцию/received: 27.08.2024; после рецензирования/revised: 05.09.2024;
принята/accepted: 09.09.2024