

5. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Микрогеометрия поверхностного слоя изделия из сплава титана, синтезированного электронным лучом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 10. С. 461–465.

6. Абразивная износостойкость сплава Ti6Al4V, полученного по технологии селективного электронно-лучевого плавления / Л.Е. Афанасьева [и др.] // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 1 (1). С. 26–35.

7. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.И. Болотов
Тверской государственный технический университет

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ ИЗНАШИВАНИИ АЛМАЗНЫМ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

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

Аннотация. Указано, что высокая объемная режущая способность керамического алмазного инструмента вызывает сложность в фиксации необходимых геометрических размеров изделия. Получены соотношения, описывающие изменение геометрических параметров обрабатываемых керамических деталей на микро- и макроуровне при абразивном алмазном изнашивании. Сделан вывод, что проведенные испытания подтвердили высокие триботехнические характеристики алмазосодержащего минералокерамического инструмента и правомерность предложенной модели.

Ключевые слова: алмазный инструмент, абразивный материал, объем, изнашиваемый материал, микротопография, поверхность, шероховатость, износ.

CHANGE IN THE GEOMETRIC PARAMETERS OF A PART WHEN IT WEARS WITH A DIAMOND ABRASIVE TOOL

Abstract. The high volumetric cutting capacity of ceramic diamond tools makes it difficult to fix the required geometric dimensions of the product. Relationships were obtained that describe the change in the geometric parameters of processed ceramic parts at the micro- and macro-level during abrasive diamond wear. The tests carried out confirmed the high tribological characteristics of diamond-containing mineral-ceramic tools and the validity of the proposed model.

Keywords: diamond tools, abrasive material, volume, wear material, microtopography, surface, roughness, wear.

Одна из современных тенденций проектирования шлифовально-абразивного инструмента в мире состоит в создании и расширении применения алмазосодержащих материалов с керамическими матрицами [1–5].

Нами разработана технология получения нового композиционного материала, представляющего собой тугоплавкую керамическую матрицу из оксида алюминия, в которую внедрены частицы алмаза. Использование алмазов крупных фракций (зернистостью выше 28/20 мкм) позволяет сформировать минералокерамический материал с высокими абразивными свойствами, который успешно применяется для изготовления режущего инструмента [6–8]. Испытания показали преимущество минералокерамического материала перед традиционными алмазосодержащими материалами при обработке высокотвердой керамики [7, 9]. Разработанный алмазосодержащий материал с керамической матрицей имеет существенно более низкий относительный расход алмаза, чем материалы с металлической и органической матрицей при одинаковых условиях изнашивания. Но, что более важно, производительность шлифования абразивных кругов из минералокерамического материала превышает эту величину для алмазных кругов с традиционными связками в 1,3–3,3 раза [9]. Практически это означает, что изнашивание керамическим алмазным инструментом происходит настолько быстро, что сложно зафиксировать требуемые геометрические размеры изделия и прекратить обработку.

Алмазосодержащие абразивные материалы применяются для шлифования керамических материалов микротвердостью до 20 ГПа, обрабатываемая поверхность выкрашивается хрупко, без заметных следов пластической деформации [10–12]. Высокая твердость детали обуславливает хрупкий износ и самого обрабатывающего инструмента. Из-за взаимного изнашивания микротопография получаемой поверхности труднопредсказуема. Шероховатость формируемой керамической поверхности определяется зернистостью алмазов, их концентрацией в объеме инструмента, сочетанием физико-механических свойств материалов матрицы и обрабатываемой детали, а также нагрузочно-скоростными режимами обработки [12, 13].

При абразивном шлифовании керамики рационально совмещать высокую производительность шлифования с обеспечением требуемых размеров детали и необходимым качеством ее поверхности. Задать оптимальные технологические параметры абразивного изнашивания возможно, так как разработанная технология позволяет варьировать зернистость и концентрацию алмазов при создании шлифовального инструмента. Давление и скорость изнашивания также задаются. Однако в настоящее время отсутствуют достоверные математические соотношения, связывающие изменение геометрических параметров изнашиваемых

керамических деталей на микро- и макроуровне с характеристиками контактирующих материалов и условиями в зоне трения в единую модель.

Цель работы – создать модель, позволяющую оценить влияние структурных компонентов абразивного минералокерамического инструмента на объем изнашиваемого материала и микротопографию обрабатываемой керамической поверхности.

Теоретические предпосылки исследований. Для описания объема сошлифованного материала при алмазно-абразивной обработке воспользуемся построением модели в рамках основного уравнения изнашивания [14, 15]. По результатам анализа трудов других авторов и оценки морфологии контактирующих поверхностей принято, что контакт микронеровностей на поверхностях трения абразивных алмазосодержащих керамических инструментов носит линейно-упругий характер. Поверхность композиционного материала будем моделировать набором сферических сегментов одинакового радиуса зерна; алмаза распределены в материале с заданной объемной плотностью. Использовано понятие эквивалентной поверхности, вершины микронеровностей которой распределены по степенному закону. Теоретически получены связь между микро- и макрохарактеристиками процесса изнашивания композиционной керамической пары трения, уравнение для расчета объема изнашиваемого в единицу времени материала Q_t :

$$Q_t = \frac{SvtmRp}{2(\nu+1)n} \left[\frac{1,5\pi q_a I_s}{tm \nu(\nu-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{\nu+1}{\nu+0,5}} \cdot \frac{I_k}{I_e},$$

где S – ширина зоны износа; ν – скорость взаимного перемещения инструмента и детали; n – число циклов, приводящих к отделению частиц износа; Rp, R, ν, tm, K_3 – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей; q_a – номинальное давление в контакте; I_s, I_k, I_e – упругие характеристики материалов алмаза, матрицы и контробразца.

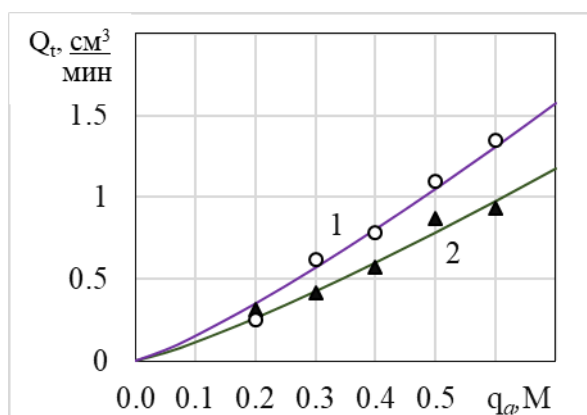
Рассчитав предварительно предполагаемый объем изношенного материала, достаточно просто определить рекомендуемые параметры обработки и состав минералокерамического материала, обеспечивающие необходимые внешние размеры детали.

Предсказать конкретные параметры шероховатости, описывающие формируемую поверхность детали при алмазно-абразивном изнашивании, заранее невозможно, так как это вероятностный, многокомпонентный процесс. На основе статистической обработки измерений параметров шероховатости контробразца по окончании шлифования планируется получить феноменологическое соотношение, описывающее среднее арифметическое отклонение профиля. Должны учитываться зернистость, концентрация алмазов в объеме инструмента, сочетание физико-механических свойств материалов матрицы и обрабатываемой детали.

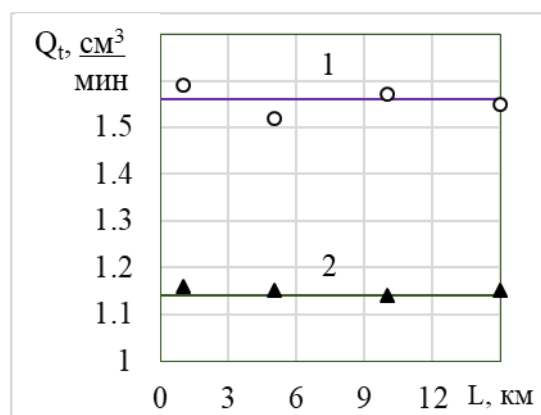
Материалы и методы исследований. Объем изнашиваемого материала (объемная режущая способность) разработанного минералокерамического композиционного материала оценивался с помощью машины трения МТ-2 [9], узел трения которой моделирует работу реального абразивного инструмента, по схеме *палец – кольцо*. Контробразцы изготовлены из керамики $BaO-SiO_2-Al_2O_3$ (твердость составляет 16 ГПа). Смазочно-охлаждающей жидкостью была техническая вода.

Анализ шероховатости контактирующих поверхностей контробразца проводился с помощью стандартных методов профилометрии (см. ГОСТ 19300-86) [16].

Результаты экспериментальных исследований. Оценка объема изношенного керамического материала при алмазно-абразивной обработке. Установлено теоретически и подтверждено экспериментально, что объем изношенного материала возрастает при увеличении скорости скольжения, приложенной нагрузки (рисунок а) и зернистости алмаза. Полученная зависимость не обуславливается путем трения, что соответствует результатам фрикционных испытаний для выбранной пары материалов (рисунок б). Данным материалам не требуется периодическая правка, так как они не подвержены засаливанию в отличие от традиционных алмазосодержащих материалов с менее твердыми матрицами. Установлено, что, согласно теоретическим расчетам и результатам экспериментов, объем изношенного материала практически не зависит от концентрации зерен алмаза. Это обусловлено близкими механическими свойствами алмаза и корундовой матрицы. При увеличении количества контактирующих зерен алмаза также снижается нагрузка на каждое отдельное зерно и объем сошлифованного материала меняется незначительно. Сплошными линиями на рисунке обозначены расчетные значения по формуле, указанной выше, а точками – результаты эксперимента.



а



б

Влияние на объем изнашиваемого материала: а – давления; б – пути резания;
1 – $d = 100/80$; 2 – $d = 63/50$

Описание параметров микро топографии изношенного керамического материала при алмазно-абразивной обработке. Существенное влияние на формирование шероховатости обрабатываемой поверхности керамического контробразца оказывает зернистость алмазов: шероховатость возрастает при использовании алмазов более крупных фракций (таблица). При изменении концентрации алмазов в абразивном инструменте в диапазонах 50–75 % и 100–12 % параметр *Ra* достаточно стабилен, в диапазоне 75–100 % и при неизменных других факторах шероховатость поверхности обрабатываемой детали плавно понижается.

Влияние характеристик минералокерамического композиционного материала на шероховатость обрабатываемой поверхности

Зернистость	Параметры шероховатости <i>Ra</i> , мкм, в зависимости от концентрации алмаза, %		
	50	100	125
100/80	1,05–0,90	0,85–0,70	0,72–0,60
80/63	0,72–0,64	0,62–0,50	0,53–0,47
63/40	0,56–0,44	0,48–0,40	0,40–0,32

Режимы шлифования оказывают меньшее влияние на морфологию поверхности детали, обрабатываемой минералокерамическим инструментом, по сравнению с характеристиками самого инструмента. Изменение силы нормального давления в зоне контакта абразивного круга и детали практически не отражается на параметрах шероховатости контробразца.

Испытания показали, что с увеличением линейной скорости скольжения (скорости вращения) абразивного минералокерамического инструмента шероховатость поверхности контробразца снижается. Основную роль в данном случае играет локальное изменение физико-механических свойств материала контробразца вследствие фрикционного разогрева поверхностей в зоне контакта. Для существенного уменьшения шероховатости скорость должна достигать очень высоких значений (шероховатость снижается вдвое при скорости скольжения более 100 м/с). Однако из конструктивных соображений эксплуатация алмазо-содержащих композиционных материалов при скоростях свыше 30 м/с нецелесообразна, так как приводит к его разрушению. В рекомендованном диапазоне скоростей и при хорошем отводе тепла из зоны трения, обеспечиваемом алюминиевой подложкой минералокерамического инструмента и смазочной жидкостью, шероховатость контробразца практически не зависит от скорости абразивной обработки.

В результате обработки результатов испытаний получена эмпирическая зависимость параметра профиля поверхности *Ra* обрабатываемой детали в виде

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

где d – зернистость алмазов в минералокерамическом материале, обозначенная цифрами нижней фракции, мкм; H_M и H_K – микротвердость материалов матрицы и контробразца соответственно, Па; K_V – объемная концентрация алмазов, %.

Расчетные значения шероховатости коррелируют с экспериментальными значениями: для d от 20 до 200 мкм и K_V от 10 до 30 %, с погрешностью, не превышающей 15 %.

Заключение. Получены соотношения, описывающие изменение геометрических параметров обрабатываемых керамических деталей на микро- и макроуровне. Объем сошлифованного материала при алмазно-абразивной обработке можно рассчитать аналитически в зависимости от концентрации и зернистости алмазов в материале, нагрузочно-скоростных режимов изнашивания. Установлена феноменологическая зависимость между структурными составляющими алмазосодержащих абразивных материалов, твердостью матрицы и характеристиками шероховатости обрабатываемой поверхности. Полученные соотношения позволят оптимизировать состав минералокерамического материала, нагрузку и время изнашивания и повысить таким образом производительность абразивной обработки при сохранении микро- и макропараметров обрабатываемых деталей.

Проведенные испытания подтвердили высокие триботехнические характеристики нового алмазосодержащего минералокерамического абразивного инструмента.

Библиографический список

1. Shenderova O.A., Gruen D.M. Ultrananocrystalline diamond: Synthesis, properties and applications. New York: William Andrew Publishing, 2006. 600 p.
2. Composites based on aluminum-silicate glass ceramic with discrete fillers / L.A. Orlova [et al.] // Glass and Ceramic. 2013. Vol. 70. Iss. 3–4. P. 149–154.
3. Consolidation of aluminum-based metal matrix composites via spark plasma sintering / G.A. Sweet [et al.] // Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 648. P. 123–133.
4. 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.

5. Liu C., Sun J. Effect of load on friction and wear behaviors of alumina matrix ceramic guideway materials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 743. P. 268–273.

6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. Вып. 12. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 80–87.

7. 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.

8. 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.

9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минерало-керамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.

10. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.

11. Kim J.H., Choi S.G., Kim S.S. A Fracture mechanics approach to wear mechanism of ceramics under non-conformal rolling friction // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. № 20 (6). P. 983–991.

12. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение: монография / П.А. Витязь [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2013. 381 с.

13. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов / А.С. Янюшкин [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 3 (76). С. 17–27.

14. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 575 с.

15. Novikova O., Novikov V., Bolotov A. Calculation of the grinding performance of diamond-bearing ceramic tools / *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. P. 240–245.

16. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1988. 11 с.