

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.892

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКОГО АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ И МОРФОЛОГИЮ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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, д. 22, e-mail: alnikbltov@ Rambler.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2021

В результате проведенных исследований оценено влияние структурных компонентов нового алмазосодержащего минералокерамического материала на его рабочие свойства. Установлено, что объемная режущая способность алмазосодержащего инструмента в процессе абразивного изнашивания стабильна, возрастает нелинейно с увеличением зернистости алмазов и незначительно снижается при увеличении их концентрации. Морфология рабочей поверхности абразивного инструмента в процессе эксплуатации практически не изменяется. Шероховатость обрабатываемой поверхности возрастает при использовании алмазов более крупных фракций. При увеличении концентрации алмазов в инструменте из минералокерамического материала параметр профиля поверхности  $R_a$  обрабатываемой детали снижается нелинейно. Предложена эмпирическая зависимость параметра  $R_a$  обрабатываемой поверхности. Показано, что абразивные инструменты, изготовленные из алмазосодержащего минералокерамического материала, в процессе эксплуатации реализуют режим самозатачивания.

*Ключевые слова:* минералокерамические материалы, алмазосодержащие инструменты, трение, изнашивание, шероховатость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-5-14**

### ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении широкое применение нашли режущие инструменты из минералокерамических композиционных материалов [1–3]. Высокие твердость, тепло- и износостойкость, стабильные режущие свойства позволяют успешно использовать инструменты из минералокерамических сплавов для точения и фрезерования широкого класса материалов. Имеющиеся недостатки минералокерамики, такие как низкая прочность на изгиб, хрупкость, слабое сопротивление циклическому изменению температуры, обуславливают необходимость разработки новых эффективных минералокерамических материалов [4–5].

Нами проведены исследования, направленные на получение нового минералокерамического материала, предназначенного для изготовления абразивного инструмента. Исходными материалами являются микродисперсная алюминиевая пудра и синтетические алмазы, металлизированные медью. Путем прессования, спекания и

микродугового оксидирования [6–8] рабочей поверхности заготовки получен композиционный материал, представляющий собой тугоплавкую оксидную матрицу, в которую внедрены частицы алмаза. Предварительные испытания показали хорошие абразивные свойства разработанного материала [7, 9]. Создание абразивного инструмента из алмазосодержащего композиционного минералокерамического материала с заранее заданными эксплуатационными параметрами: высокой производительностью шлифования и необходимым качеством обрабатываемой поверхности – требует дополнительного изучения [10–12].

На режущую способность и качество обрабатываемой поверхности при абразивной обработке, помимо эксплуатационных параметров, влияет большое число факторов, но основной вклад вносят зернистость и концентрация алмазов, сочетание физико-механических свойств алмазов и матрицы [12, 13].

Цель исследования – установить влияние структурных компонентов нового абразивного минералокерамического композиционного материала на его рабочие свойства: режущую способность, характеристики шероховатости рельефа инструмента и качество обрабатываемой поверхности.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Абразивные свойства разработанного минералокерамического композиционного материала оценивались на машине трения МТ-2 [11], узел трения которой реализован по схеме палец – кольцо. Анализ структуры его режущей поверхности и морфологии обрабатываемой поверхности контрообразца проводился с помощью металлографического микроскопа и стандартных методов профилометрии по ГОСТ 19300-86 [14].

Для сравнительного анализа аналогичные данные получены для традиционно применяемых инструментальных алмазосодержащих материалов с металлической (М1) и органической бакелитовой (Б1) матрицами. В качестве смазки использована техническая вода. Контрообразцы изготовлены из керамики  $BaO-SiO_2-Al_2O_3$  (твердость 16 ГПа). Давление на контакте 1 МПа, линейная скорость скольжения 30 м/с.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Влияние структуры инструмента из минералокерамического материала на его работоспособность.** Результаты исследования объемной режущей способности керамического контрообразца представлены на рис. 1. Режущие свойства абразивных материалов коррелируют с твердостью материала матрицы. Материал с керамической матрицей показал лучшие характеристики, что объясняется наиболее высоким сопротивлением матрицы абразивному воздействию частиц износа (рис. 1а, б). Нелинейное возрастание режущей способности абразивных материалов с увеличением зернистости алмазов не зависит от вида матрицы и характерно для всех испытываемых алмазосодержащих материалов (рис. 1а). При возрастании зернистости до 100/80 мкм превалирующим фактором является увеличение вылета режущих зерен над поверхностью матрицы и, соответственно, увеличение объема изнашиваемого материала. Дальнейший рост радиусов алмазных зерен ведет к сглаживанию их режущих углов, скруглению вершин, и повышению объемной режущей способности практически не наблюдается.

Увеличение концентрации алмазов в абразивном материале несколько снижает его объемную режущую способность (рис. 1б), что связано с трудностями удаления частиц износа из зоны трения.

Алмазосодержащий материал с матрицей М1 показал наиболее сопоставимую с минералокерамикой величину режущей способности, однако для поддержания ее на высоком уровне инструменту была необходима периодическая правка, которая удаляет его «засаленность» продуктами износа. Установлено, что образцы алмазосодержащих материалов с матрицами М1 и Б1 снижают работоспособность примерно в 2,6...6,7 раза в течение 20 мин работы. У минералокерамического материала она практически не изменяется (уменьшается за аналогичное время всего на 4...6 %). Стабильно высокая режущая способность позволяет предположить, что абразивные инструменты из минералокерамики функционируют в режиме самозатачивания.

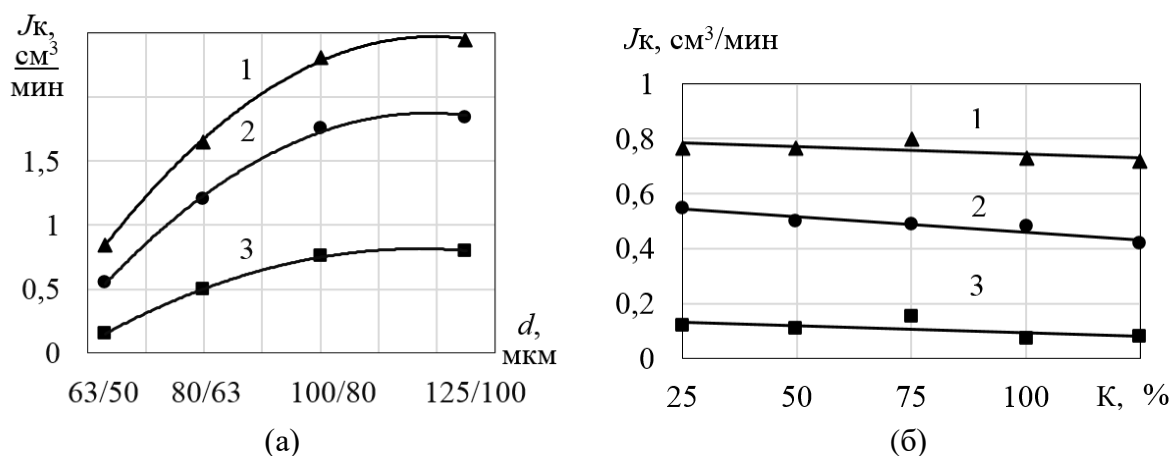


Рис. 1. Влияние зернистости (а) и концентрации алмазов (б) на объемную режущую способность алмазосодержащих материалов: 1 – керамическая матрица; 2 – матрица М1; 3 – матрица Б1

**Изменение морфологии рабочей поверхности минералокерамического абразивного инструмента в процессе эксплуатации.** Сложная морфология режущей поверхности абразивного алмазосодержащего минералокерамического инструмента является следствием трехмерной внутренней структуры, представляющей собой тугоплавкую керамическую матрицу из оксидов алюминия, в которой равномерно распределены металлизированные медью зерна алмазов (рис. 2). На рис. 2а, б приведены изображения поверхностей износа образцов с различной массовой концентрацией алмазов К. На этих изображениях хорошо видны алмазы, встроенные в матрицу на различной глубине. После фрикционных испытаний на керамической матрице отсутствуют следы износа, алмазы значительно выступают над поверхностью матрицы, их режущие кромки сохраняют остроту.

Сравнение морфологии изношенных поверхностей минералокерамического материала и образца с матрицей М1 (рис. 3) показывает значительные преимущества первого. Поверхность показавшего достаточно высокую объемную режущую способность алмазосодержащего материала с матрицей М1 имеет выраженные следы пластического деформирования матрицы, алмазные зерна «засалены» частицами износа.

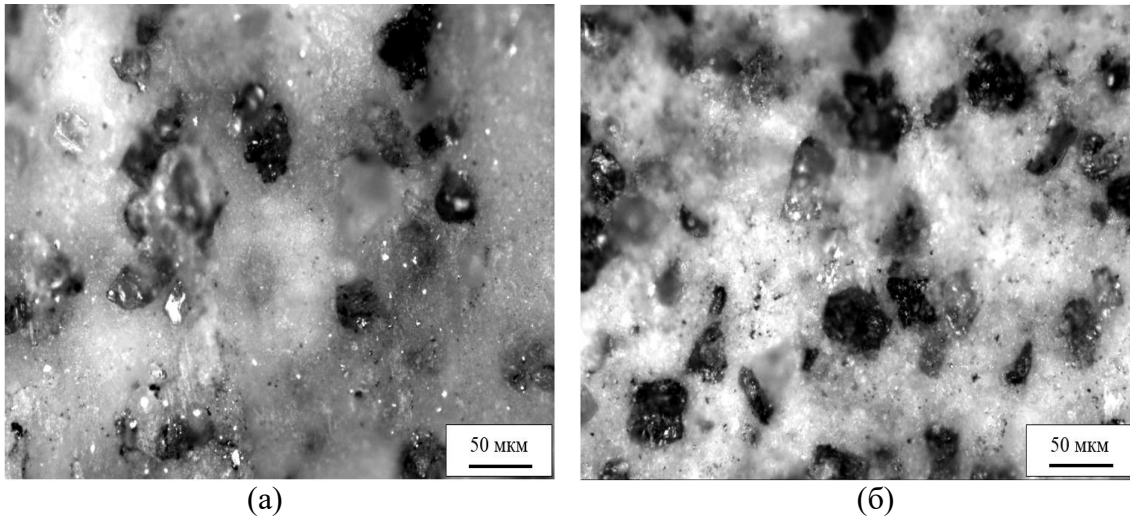


Рис. 2. Структура поверхности трения образцов из минералокерамики после испытаний:  $d = 63/50$  мкм,  $K = 75\%$  (а);  $d = 63/50$  мкм,  $K = 100\%$  (б)

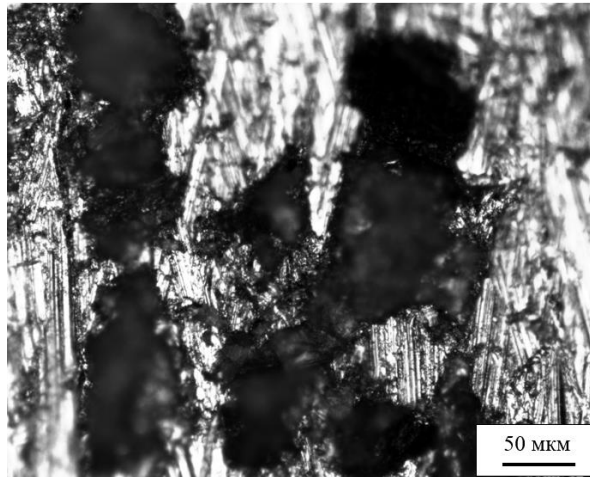


Рис. 3. Структура поверхности трения образцов с металлической матрицей после испытаний:  $d = 80/63$  мкм,  $K = 75\%$

Анализ профилограмм показывает, что микрогеометрия режущей поверхности минералокерамического инструмента практически не изменяется в процессе эксплуатации (рис. 4а, б). Высота и шаг микронеровностей изменились несущественно, выглаживание режущих вершин минимально. Геометрический размер периодически повторяющихся неровностей (средний шаг микронеровностей) соответствует среднему размеру зерен алмаза в составе образца. Отсутствует отклонение от цилиндричности инструмента: поверхность образца сохраняет правильную геометрическую форму.

Для сравнения приведена профилограмма алмазосодержащего материала с матрицей Б1, полученная после испытаний при аналогичных режимах без дополнительной правки инструмента (рис. 4в). Исходные профили поверхностей образцов из минералокерамики и Б1 имели практически одинаковые параметры микрогеометрии, но после трибовоздействия они существенно различаются (рис. 4б, в). На профилограмме образца Б1 виден резко выраженный рельеф с глубокими

впадинами, оставленными, вероятно, удаленными из поверхности алмазами вместе с частью матрицы. Имеются хаотично расположенные горизонтальные участки, образованные выглаживанием мягкой поверхности матрицы. На рабочей поверхности абразивного инструмента Б1 после фрикционного воздействия сформировано заметное отклонение от цилиндричности инструмента (бочкообразность).

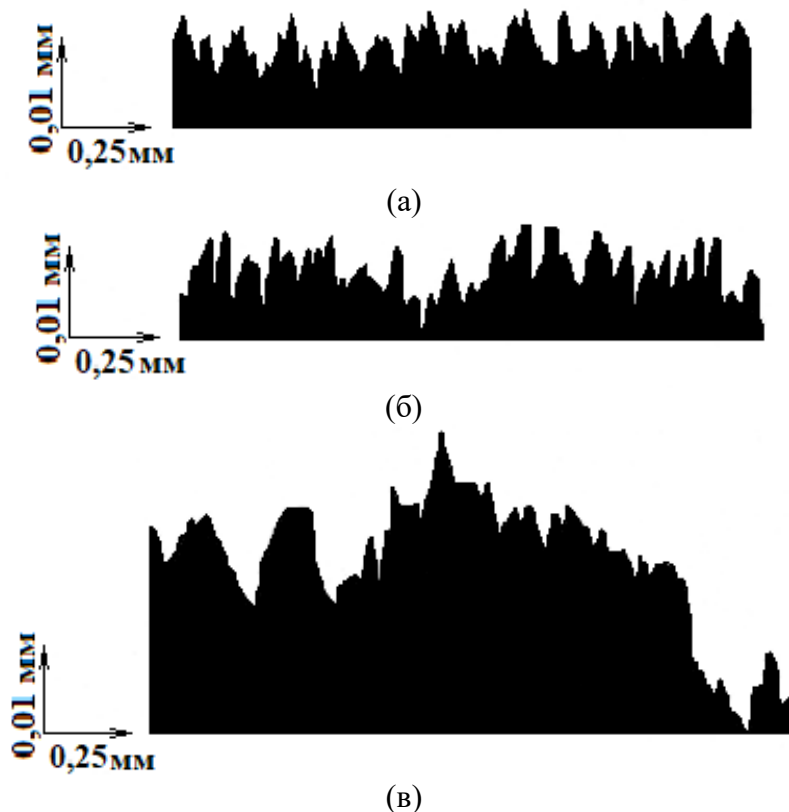


Рис. 4. Профилограммы рабочих поверхностей алмазосодержащих инструментов с матрицами различных типов: оксидная керамика до испытаний (а); оксидная керамика после испытаний (б); матрица Б1 после испытаний (в)

Стабильность профиля режущей поверхности минералокерамического инструмента, определяющая его высокую работоспособность, является несомненным преимуществом по сравнению с традиционными материалами. Высокая твердость и антифрикционные свойства этих составляющих [1–3, 15, 16] обеспечивают сопротивление к абразивному износу рабочей поверхности инструмента. Корундовая матрица, обладая высоким алмазодержанием, обеспечивает значительный вылет режущих зерен над материалом связки и не позволяет алмазам удаляться под действием сил трения до полного износа. При этом уменьшается площадь контакта матрицы и обрабатываемого материала, сохраняется стабильным профиль инструмента. Учитывая эти факты и близкие механические свойства структурных составляющих композита, можно предположить, что изношенные алмазы удаляются с режущей поверхности вместе с частью окружающей их матрицы, обнажая новые зерна, реализуя режим самозатачивания. Высокая теплопроводность алюминиевой подложки обеспечивает хороший отвод тепла из зоны трения, препятствует незапланированной графитизации алмазных зерен и снижению их режущих свойств от воздействия высокой температуры, вызванной фрикционным разогревом.

**Влияние характеристик минералокерамического абразивного материала и режимов шлифования на морфологию обрабатываемой поверхности.** В результате проведенных сравнительных испытаний было установлено, что шероховатость контробразца не коррелирует обратно пропорционально с твердостью материала матрицы (таблица). Наиболее твердая минералокерамическая матрица обеспечивает средние значения параметра  $Ra$  между более мягкими матрицами М1 и Б1.

Влияние характеристик алмазосодержащих абразивных материалов на шероховатость обрабатываемой поверхности

Материал матрицы	Зернистость, мкм	Параметры шероховатости $Ra$ , мкм, при концентрации алмаза $K$ , %		
		50	100	125
Оксидная керамика	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
М1	100/80	1,30...1,10	1,10...0,95	0,90...0,75
	80/63	0,95...0,85	0,80...0,70	0,65...0,55
	63/40	0,72...0,60	0,60...0,50	0,50...0,42
Б1	100/80	0,70...0,58	0,63...0,50	0,40...0,32
	80/63	0,52...0,40	0,40...0,32	0,32...0,25
	63/40	0,42...0,30	0,32...0,25	0,25...0,20

Как видно из представленных данных, существенное влияние на формирование морфологии обрабатываемой поверхности керамического контробразца оказывает зернистость алмазов: шероховатость возрастает при использовании алмазов более крупных фракций (независимо от материала матрицы). Влияние концентрации алмазов в инструменте из минералокерамического материала более сложно. При изменении ее в диапазонах 50...75 и 100...125 % параметр  $Ra$  достаточно стабилен, в диапазоне 75...100 % и при неизменных других факторах шероховатость поверхности обрабатываемой детали плавно понижается.

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 конструкционных соображений эксплуатация алмазосодержащих композиционных материалов при скоростях свыше 30 м/с нецелесообразна, так как приводит к их 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:

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

где  $d$  – зернистость алмазов в минералокерамическом материале, обозначенная численными значениями 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

Благодаря сочетанию уникальных по физико-механическим свойствам материалов – алмаза и корундовой матрицы, получен новый алмазосодержащий минералокерамический материал, обладающий высокими триботехническими параметрами. Выполненные из него абразивные инструменты характеризуются стабильно высокой объемной режущей способностью, хорошим алмазодержанием, теплостойкостью, в процессе эксплуатации реализуют режим самозатачивания.

Установлена связь между рабочими и структурными составляющими алмазосодержащих абразивных материалов, твердостью матрицы, характеристиками шероховатости рельефа обрабатываемой поверхности.

Результаты исследований, полученные при детальном изучении связи между зернистостью, концентрацией алмазов, морфологией алмазосодержащего минералокерамического инструмента и морфологией обрабатываемой поверхности, будут использованы при проектировании новых абразивных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar G.B.V. Rao C.S.P., Selvaraj N., Bhagyashekar M.S. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al2O3 metal matrix composites // *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2010. V. 9. № 1. P. 43–55.
2. Orlova L.A., Chainikova A.S., Popovich N.V., Lebedeva Y.E. Composites based on aluminum-silicate glass ceramic with discrete fillers // *Glass and Ceramics*. 2013. V. 70. № 3–4. P. 149–154.
3. Sweet G.A., Brochu M., Hexemer R.L., Donaldson I.W., Bishop D.P. Consolidation of aluminum-based metal matrix composites via spark plasma sintering // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 648. P. 123–133.

4. Попов А.И., Зейдан М.Н. Повышение работоспособности режущих пластин из минералокерамики ионно-вакуумной обработкой // *Металлообработка*. 2006. № 4. С. 16–19.
5. Jessen T., Ustundag E. (ed.). 24th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures-A. John Wiley & Sons, 2009. V. 238. 759 p.
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*. 2019. № 12. 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. Минералокерамический 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. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2017. № 10. С. 153–157.
12. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение: монография. Минск: Беларуская навука, 2013. 381 с.
13. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 3 (76). С. 17–27.
14. ГОСТ 19300-86 Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1988. 11 с.
15. Xu H., Yang Z., Li M. K., Shi Y. L., Huang Y., Li H.L. Synthesis and properties of electroless Ni-P-Nanometer Diamond composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 191. № 2–3. P. 161–165.
16. Gubarevich A.V., Usuba S., Kakudate Y., Tanaka A., Odawara O. Diamond powders less than 100 nm in diameter as effective solid lubricants in vacuum // *Japanese Journal of Applied Physics. Part 2: Letters*. 2004. V. 43. № 7A. P. L920.

**Для цитирования:** 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.



# INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF MINERAL-CERAMIC ABRASIVE MATERIAL ON THE OPERATIONAL PARAMETERS AND MORPHOLOGY OF THE TREATED SURFACE

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,  
Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

As a result of the studies carried out, the influence of the structural components of the new diamond-containing mineral-ceramic material on its working properties was evaluated. The volumetric cutting ability of a diamond-containing tool, which is stable in the process of abrasive wear, increases nonlinearly with an increase in the grain size of diamonds and slightly decreases with an increase in their concentration. The morphology of the working surface of the abrasive tool practically does not change during operation. It has been established that the roughness of the treated surface increases when using diamonds of larger fractions. With an increase in the concentration of diamonds in a tool made of a mineral-ceramic material, the parameter of the surface profile Ra of the workpiece does not decrease linearly. An empirical dependence of the parameter Ra of the treated surface is proposed. It has been established that abrasive tools made of diamond-containing mineral-ceramic material in the process of operation realize the mode of self-sharpening.

*Keywords:* mineral ceramic materials, diamond-containing tools, friction, wear, roughness.

## REFERENCES

1. Kumar G.B.V. Rao C.S.P., Selvaraj N., Bhagyashakar M.S. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2010. V. 9. No 1, pp. 43–55.
2. Orlova L.A., Chainikova A.S., Popovich N.V., Lebedeva Y.E. Composites based on aluminum-silicate glass ceramic with discrete fillers. *Glass and Ceramics*. 2013. V. 70. No 3–4, pp. 149–154.
3. Sweet G.A., Brochu M., Hexemer R.L., Donaldson I.W., Bishop D.P. Consolidation of aluminum-based metal matrix composites via spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 648, pp. 123–133.
4. Popov A.I., Mohammad N.Z. Increase of serviceability of cutting plates from mineral ceramics by ionic-vacuum processing. *Metallobrabotka*. 2006. No 4 (34), pp. 16–19. (In Russian).
5. Jessen T., Ustundag E. (ed.). 24th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures-A. John Wiley & Sons, 2009. V. 238. 759 p.
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Formation of matrix of almazcontaining composite ceramic instrumental material. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2019. No 12, pp. 80–87. (In Russian).
7. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Synthesis of diamond ceramic coated abrasive tools for precision micromachining of superhard materials. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*. 2020. No 4, pp. 30–37. (In Russian).

8. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Research of modes of formation of diamond-containing ceramic abrasive material by the method of microarc oxidation. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2020. No 2 (6), pp. 5–13. (In Russian).

9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Mineral ceramic composite material: synthesis and friction behavior. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2020. V. 22. No 3, pp. 59–68. (In Russian).

10. Sudnik L.V., Vityaz P.A., Ilushchenko A.F. Almazosoderzhashchie abrazivnye nanokompozity [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2012. 319 p. (In Russian).

11. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Dependence of wear of a friction pair of a composite diamond-containing material – ceramics. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2017. No 10, pp. 153–157. (In Russian).

12. Vityaz P.A. Nanoalmazny detonatsionny sintez: poluchenie i primeneniye: monografiya [Detonation synthesis nanodiamonds: production and application: monograph]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2013. 381 p. (In Russian).

13. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Gartfelder V.A., Sekletina L.S. Enhancing the effectiveness of the diamond metal bond instrument when grinding high-strength materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2017. No 3 (76), pp. 17–27. (In Russian).

14. GOST 19300-86 Sredstva izmerenij sherohovatosti poverhnosti profilnym metodom. Profilografy-profilometry kontaktnye. Tipy i osnovnye parametry [Means for measuring surface roughness by the profile method. Contact profilometers-profilometers. Types and basic parameters]. Moscow: Izd-vo standartov, 1988. 11 p. (In Russian).

15. Xu H., Yang Z., Li M. K., Shi Y. L., Huang Y., Li H.L. Synthesis and properties of electroless Ni-P-Nanometer Diamond composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 19. No 2–3, pp. 161–165.

16. Gubarevich A.V., Usuba S., Kakudate Y., Tanaka A., Odawara O. Diamond powders less than 100 nm in diameter as effective solid lubricants in vacuum. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 2: Letters*. 2004. V. 43. No 7A. P. L920.

Поступила в редакцию/received: 03.01.2021; после рецензирования/revised: 05.03.2021;  
принята/accepted: 09.03.2021