

## СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО АБРАЗИВНЫХ СВОЙСТВ

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

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

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В., 2020

Разработан инновационный алмазосодержащий композиционный материал, сформированный методом микродугового оксидирования на поверхности спеченной заготовки из алмазно-алюминиевой смеси. Предложен способ модификации базовой технологии получения материала с целью снижения энергозатрат и улучшения его фрикционных свойств. При замене части алюминиевой пудры порошком электрокорунда белого, спекании и формировании алмазно-керамического материала методом микродугового оксидирования сокращается общее время формирования материала. Установлено, что добавка порошка корунда оказывает положительное влияние на ход процесса микродугового оксидирования. Разработана принципиальная структурная модель нового материала. Фрикционные испытания показали преимущество алмазосодержащих материалов модифицированного состава по сравнению с базовым. Предлагается для прецизионной абразивной микрообработки твердых материалов применять новый материал в качестве инструментального.

*Ключевые слова:* абразивный керамический материал, микродуговое оксидирование, модификации оксида алюминия, трение, износ.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-22-32**

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы область применения алмазно-абразивных материалов значительно расширилась, что обусловлено разработкой и внедрением новых видов связующих матриц, в которые встраиваются зерна алмазов [1–7]. Для достижения высоких технико-экономических показателей абразивной обработки необходимо правильно определить оптимальную область применения каждого инструментального материала [7–11].

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить уникальный абразивный алмазосодержащий керамический материал, обладающий качественно более высокими по сравнению с известными фрикционными характеристиками [12, 13]. Основной рабочий слой материала формируется методом микродугового оксидирования (МДО) на поверхности спеченной алмазно-алюминиевой заготовки в виде керамического покрытия, определенной толщины, с дисперсными включениями металлизированного медью алмаза [14–16]. Весь процесс получения керамического материала продолжается достаточно длительное время (порядка 3...4 ч), что влечет существенные расходы.

Экономический анализ получения керамического композиционного материала показал, что значительные затраты электроэнергии расходуются в процессе МДО при преобразовании алюминиевой матрицы в оксид алюминия  $Al_2O_3$ . В связи с этим было предложено внести уточнение в технологию его получения: заменить часть алюминиевой пудры порошком белого корунда. Белый электрокорунд по химическому

и физическому составу является наиболее однородным из видов оксида алюминия. В процессе его производства чистая окись алюминия расплавляется в дуговой печи, в результате чего модификация  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  превращается в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  [17]. Предполагается, что данная корректировка технологии позволит сократить общее время формирования материала, снизить расходы на энергопотребление. Необходимо оценить, как добавка белого корунда в состав смеси заготовки для получения алмазосодержащего керамического материала скажется на протекании процесса МДО и триботехнических свойствах сформированного многокомпонентного материала.

Цель исследования – определение особенностей формирования нового энергоэффективного алмазосодержащего керамического материала и оценка влияния модифицирующих добавок на его триботехнические свойства и перспективы практического применения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления матрицы композиционного алмазосодержащего материала использовалась алюминиевая пудра, порошок электрокорунда белого 25А. Наполнителем являлись синтетические алмазы марки АС6, покрытые медью, сформированной методом химического осаждения на их поверхности.

Оксидирование спеченных образцов [13], базового и модифицированного составов проводили на оборудовании, включающем в себя источник питания; гальваническую ванну с рубашкой охлаждения; компрессора для сжатого воздуха, вытяжной вентиляции, дистиллятора. Состав электролита – едкий натрий NaOH (2 г/л), жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (6 г/л). Плотность тока – 10 А/дм<sup>2</sup>.

Фрикционные характеристики образцов исследовали на машине трения МТ-2, реализующей схему «палец-кольцо» [18]. Смазочный материал – техническая вода, материал контробразца – керамический материал на основе BaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (твердость материала – 16 ГПа).

Относительный расход алмазов  $J_a$  композиционного керамического материала, характеризующий износостойкость материала, при испытаниях в режиме абразивного инструмента определялся как отношение массы алмазов, находившихся в изношенном алмазоносном слое, к массе изношенного материала контртела [19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Технология получения композиционного материала.** Проведенные исследования показали, что сокращение времени формирования покрытия при сохранении его триботехнических свойств достигается при замене 10...25 об. % алюминиевой пудры порошком корунда, зернистость которого в 2...10 раз меньше зернистости алмазного порошка. Для оценки энергоэффективности, которая находится в прямой зависимости от времени МДО, были использованы алмазы зернистостью  $d$  63/50 со степенью металлизации  $M$  75 %. Концентрация алмазов  $K$  в испытуемых образцах составляла 100 %, относительная плотность керамического материала  $Q$  – 90 %. Выбор зернистости и количества вводимого порошка корунда обусловлен представленными далее в статье выводами, сделанными по результатам испытаний.

Замена порошком корунда менее 10 об. % алюминиевой пудры не оказывала существенного влияния на процесс МДО, его ускорение практически не происходило (табл. 1). При замене порошком корунда более 25 об. % алюминиевой пудры диэлектрическая структура многокомпонентного материала значительно изменялась, что привело к локальному снижению плотности тока, необходимого для возникновения микродуговых разрядов. Процесс МДО протекал неустойчиво; толщина формируемого покрытия была недопустимо низкой, на нем присутствовали очаги электрохимической коррозии.

При использовании корунда зернистостью, сравнимой с зернистостью алмазного зерна, происходило формирование пористого алмазосодержащего композиционного материала с низкой конструкционной прочностью. Его относительная плотность была ниже, чем у материала, полученного по первоначальной технологии, на 13...27 % при сопоставимых условиях прессования и спекания. Поэтому образовавшийся материал заведомо обладал худшими механическими и триботехническими свойствами.

При использовании порошка корунда зернистостью, которая в 10 и более раз ниже зернистости алмазного порошка, сформированный МДО алмазосодержащий композиционный материал имел, в отличие от материала, полученного по первоначальной технологии при аналогичных режимах, значительно меньшую толщину (табл. 2). Это было обусловлено существенным изменением диэлектрической структуры спеченной композиционной матрицы, которая препятствует проникновению электрического поля в глубину обрабатываемого материала в процессе оксидирования [20]. В результате этого внутри композиционного материала мощность микродуговых разрядов была не всегда достаточной для перехода частиц алюминия в высокотвердый оксид алюминия и формирования сплошного композиционного слоя из алмазов и корунда. Кроме того, периодически на формируемом покрытии возникали очаги электрохимической коррозии. Все эти особенности протекания процесса оксидирования приводили к резкому снижению толщины, прочности и, как следствие, износостойкости получаемого композиционного алмазосодержащего материала.

Таблица 1. Влияние количества порошка корунда на энергоэффективность покрытия и его толщину

Объемная доля порошка $Al_2O_3$ , %	Время процесса МДО, ч	Толщина материала, мм
0	3	1,1
10	2,5	1,05
17	2,25	1,03
25	2,3	0,85

*Примечание:* зернистость порошка  $Al_2O_3$  – М14.

Таблица 2. Влияние зернистости порошка корунда на энергоэффективность покрытия и его толщину

Зернистость порошка $Al_2O_3$	Размер зерен $Al_2O_3$ основной фракции, мкм	Время процесса МДО, ч	Толщина материала, мм
М7	7...5	2,8	0,76
М14	14...10	2,25	1,03
М28	28...20	2,6	0,87

*Примечание:* объемная доля порошка  $Al_2O_3$  – 17 %.

Было установлено, что время формирования композиционного алмазного керамического материала при применении модифицированной технологии сокращается в 1,2...1,3 раза. Наиболее оптимальный результат интенсификации процесса МДО достигается при замене 15...20 об. % алюминиевой пудры порошком корунда зернистостью, в 5...6 раз меньшей зернистости алмазного зерна.

Типичные хронограммы формирования композиционного материала базового и модифицированного состава методом МДО показаны на рис. 1. Установлено, что добавка порошка корунда в материал смеси для матрицы композиционного материала оказывает положительное влияние на ход процесса микродугового оксидирования. Время выхода на режим гальванолюминисценции при формировании модифицированного материала сокращалось, тем самым увеличивался период действия устойчивых искровых разрядов, формирующих материал.

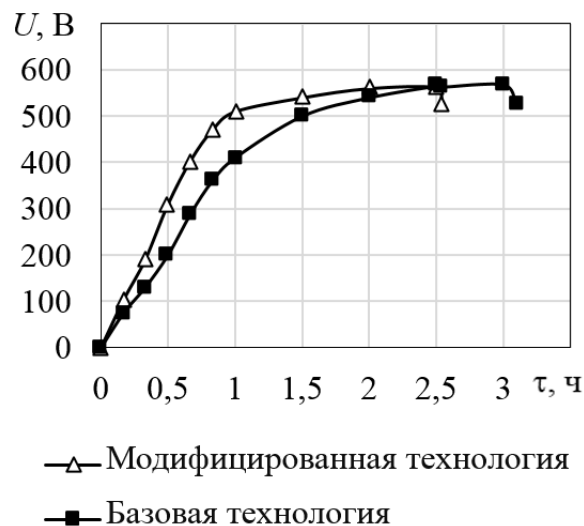


Рис. 1. Зависимость напряжения от времени ведения процесса МДО при объемной доле порошка  $Al_2O_3 = 17\%$ ,  $d = 63/50$ ,  $M = 100\%$

В результате микроструктурного анализа образцов из алмазосодержащего керамического материала модифицированного состава была разработана его принципиальная структурная модель (рис. 2). Структура материала представляет собой зерна алмаза, имеющие медные нанопокрывтия, которые внедрены в пористую керамическую матрицу. Матрица имеет неоднородный вид, т. е. является сложным комплексом из  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -модификаций оксидов алюминия, сформированных в процессе МДО спеченной алюминиевой пудры.

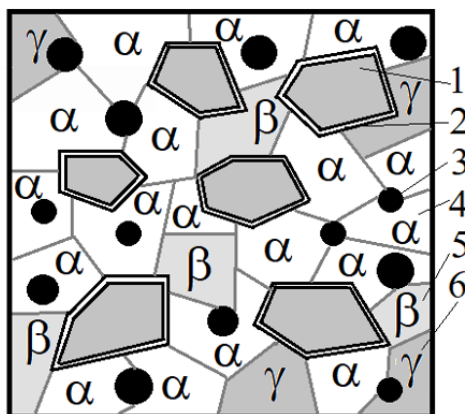


Рис. 2. Принципиальная структурная модель алмазосодержащего керамического материала: 1 – зерна алмаза; 2 – слой меди; 3 – поры; 4 –  $\alpha$ - $Al_2O_3$ ; 5 –  $\beta$ - $Al_2O_3$ ; 6 –  $\gamma$ - $Al_2O_3$

Модификация  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , или корунд, преобладает, так как является наиболее устойчивой. Корунд характеризуется наилучшим комплексом физико-механических свойств по сравнению с другими модификациями (высокой твердостью, химической и температурной стойкостью, хорошими фрикционными свойствами) и успешно применяется в качестве абразивного материала. Замена части алюминиевой пудры порошком белого корунда, который изначально является только оксидом  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , позволяет повысить долю  $\alpha$ -модификации корунда в материале матрицы и улучшить механические и триботехнические свойства композиционного керамического материала, модифицированного состава по сравнению с базовым.

**Результаты сравнительных триботехнических испытаний базового и модифицированного материалов.** На рис. 3 приведены данные, полученные при изучении влияния зернистости и концентрации алмазов в инструментах, изготовленных из алмазосодержащих керамических материалов базового и модифицированного состава (объемная доля порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 17 %), на триботехнические характеристики пары трения: абразивный керамический инструмент – обрабатываемая деталь. На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $J_a$  – массовый расход алмазного порошка отнесенный к массе изношенного слоя контробразца;  $J_k$  – скорость объемного износа контробразца.

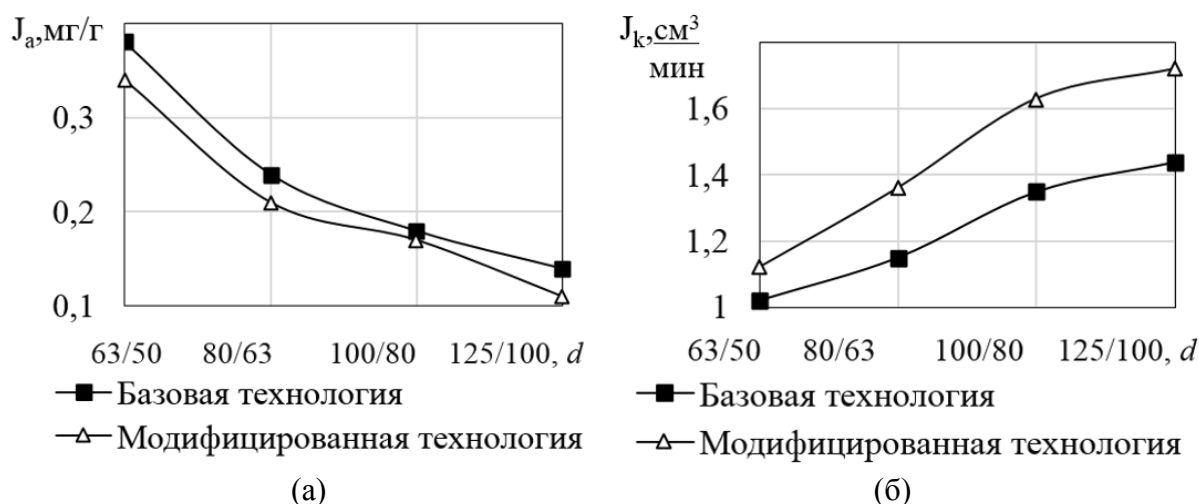


Рис. 3. Влияние зернистости алмазов в композиционных керамических материалах на величину износа абразивных кругов (а) и интенсивность объемного износа контробразца (б):  $K = 100 \%$ ,  $M = 75\%$

При увеличении зернистости алмазов износостойкость кругов из алмазосодержащего керамического материала повышается в обоих случаях (см. рис. 3а), как было отмечено ранее, в связи с повышением твердости в целом всего материала. Износостойкость материала, изготовленного по модифицированной технологии, несколько выше. В данном случае сказывается положительная роль увеличения содержания в матрице  $\alpha$ -модификации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , достигнутая введением порошка белого корунда, имеющего наиболее высокую твердость в сравнении с другими модификациями. При трении алмазосодержащих керамических материалов твердость матрицы играет значительную роль, так как с ней контактируют выступающие неровности контробразца (керамика состава  $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  и твердостью 16 ГПа). Увеличение твердости матрицы способствует повышению ее сопротивления к абразивному изнашиванию твердыми продуктами износа керамического контробразца и абразивного материала, уменьшению вероятности преждевременного выкрашивания

режущих алмазных зерен. В результате снижаются величина относительного расхода алмаза и экономические затраты на абразивную обработку деталей инструментами, изготовленными по модифицированной технологии.

Зернистость алмазов в композиционном материале является наиболее значимым фактором, определяющим интенсивность объемного износа контробразца (иначе – объемную режущую способность будущего абразивного инструмента, изготовленного из предлагаемого материала) (см. рис. 3б). С увеличением зернистости алмазов в материалах, изготовленных по обеим технологиям, интенсивность объемного износа контробразца растет практически линейно в интервале 63/50...100/80. Это можно объяснить увеличением высоты выступания режущих зерен алмаза из материала матрицы и процента активных режущих зерен, ранее не участвующих во фрикционном взаимодействии из-за неравномерного распределения зерен по высоте. При дальнейшем увеличении размера алмазов рост интенсивности объемного износа контробразца несколько замедляется, что вызвано различными факторами. Увеличение зернистости ведет к изменению геометрических параметров частиц алмаза, а именно увеличению радиусов округления вершин и уменьшению остроты режущих кромок. При увеличении зернистости также уменьшается общее число режущих алмазных зерен на единицу рабочей поверхности абразивного материала.

Алмазосодержащие керамические материалы модифицированного состава показали несколько большую величину интенсивности объемного износа контробразца или объемную режущую способность по сравнению с базовыми. Повышение твердости матрицы за счет увеличения в ее составе  $\alpha$ -модификации  $Al_2O_3$  способствует упругому деформированию при внедрении алмазосодержащей абразивной поверхности в обрабатываемый материал. Как было отмечено выше, прочная связка лучше удерживает алмазные зерна, не позволяет им выкрашиваться из поверхности до достижения значительного износа режущих поверхностей. Высокая твердость матрицы материала способствует реализации режима самозатачивания инструмента из модифицированного алмазосодержащего керамического материала. На рис. 4 приведен внешний вид экспериментального абразивного инструмента.



Рис. 4. Экспериментальные шлифовальные круги из композиционного материала

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали проведенные исследования, инструменты, изготовленные из нового упрочненного композиционного материала, обладают более высокими функциональными свойствами в сравнении с традиционными абразивными алмазосодержащими материалами. Материалы сочетают в себе высокую режущую способность с низкой величиной относительного расхода алмазов. В процессе эксплуатации абразивные инструменты из разработанного материала функционируют в режиме самозатачивания и могут эффективно применяться для обработки специальных изделий из высокотвердых материалов.

Новый синтезированный абразивный материал будет востребован для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов в различных отраслях точного машиностроения. Механическая абразивная обработка, проводимая малоразмерными алмазосодержащими инструментами на керамической связке, незаменима при изготовлении сложнопрофильных деталей из твердого стекла, минералов, керамики, твердых сплавов, ферритов, германия и других особо прочных материалов.

Внедрение операций прецизионной микрообработки деталей, проводимых абразивными алмазосодержащими инструментами, позволит существенно увеличить экономическую эффективность и качество продукции при производстве электронной техники, в точном приборостроении, ювелирной и часовой промышленности. Предлагаемый материал найдет применение в современной микрохирургии, в частности при изготовлении алмазных стоматологических боров и инструмента для обработки костной ткани, для производства мелкогабаритных элементов медицинского оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bushlya V., Lenrick F., Gutnichenko O., Petrusha I., Osipov O., Kristiansson S., Stahl J. E. Performance and wear mechanisms of novel superhard diamond and boron nitride-based tools in machining Al-SiCp metal matrix composite // *Wear*. 2017. V. 376. P. 152–164.
2. Guo L., Zhang X., Chen S., Hui J. An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools // *Materials*. 2019. V. 12. № 1. P. 125.
3. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Romashov D.V., Fedorenko D.O. Principles of 3D modelling of the production and application of diamond composite materials // *Nanotechnology Perceptions*. 2012. № 8(2), P. 132–138.
4. Витязь П.А., Сенюць В.Т. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2015. № 3. С. 60–76.
5. Loginov P., Mishnaevsky L., Levashov E., Petrzhik M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performance: Development, testing and modelling // *Materials and Design*. 2015. № 88. P. 310–319.
6. 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.
7. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокомпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.

8. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Ohmori H. Abrasives and abrasive tools. In *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Elsevier. 2013 P. 243–311.
9. Kunimine T., Shibuya M., Sato H., Watanabe Y. Fabrication of copper diamond functionally graded materials for grinding wheels by centrifugal sintered - casting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. № 217. P. 294–301.
10. Clark W. I., Shih A. J., Hardin C. W., Lemaster R. L., McSpadden, S. B. Fixed abrasive diamond wire machining. Part I: Process monitoring and wire tension force // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. № 43 (5). P. 523–532.
11. Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. Износостойкость шлифовальных кругов из алмазосодержащих материалов инструментального назначения // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № S1-1. С. 430–432.
12. Bolotov A, Novikova O, Novikov V. Synthesis and friction properties of a multifunctional diamond-containing ceramic material // *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19. P. 2449–2453.
13. 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.
14. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. № 389 (1–2). P. 169–176.
15. Qin D., Xu G., Yang Y., Che, S. Multiphase Ceramic Coatings with High Hardness and Wear Resistance on 5052 Aluminum Alloy by a Microarc Oxidation Method // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2018. № 6 (2). P. 2431–2437.
16. Xue W., Wu X., Li X., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte // *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. № 425(1–2). P. 302–306.
17. Полубелова А.С., Крылов В.Н., Карлин, Ефимова И.С. Производство абразивных материалов. М: Машиностроение, 1968. 180 с.
18. 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.
19. ГОСТ 14706-78 Алмазы и инструменты алмазные. Термины и определения (с изменением № 1). М.: Издательство стандартов, 1985. 11 с.
20. Markov M.A., Vykova A.D., Krasikov A.V., Farmakovskii V.V., Gerashchenkov D. A. Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. № 59(2). P. 207–214.

**Для цитирования:** 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. № 1 (5). С. 22–31.



## SYNTHESIS OF THE COMPOSITE CERAMIC MATERIAL AND INVESTIGATION OF ITS ABRASIVE PROPERTIES

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

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

The innovative diamond-containing composite material formed by micro-arc oxidation on the surface of a sintered billet from a diamond-aluminum mixture has been developed. The method of the modification of the basic technology of a material obtaining has been proposed in order to reduce energy consumption and improve its frictional properties. The total time of material formation is reduced by replacing a part of the aluminum powder with white fused abrasive alumina powder, subsequent sintering and formation of diamond-ceramic material by micro-arc oxidation. It was found that the addition of corundum powder has a positive effect on the progress of the microarc oxidation process. A basic structural model of the new material has been developed. Friction tests have shown the advantage of diamond-containing materials of modified composition in comparison with the basic one. It is proposed to use the new material as a tool one for precision abrasive micro-processing of solid materials.

*Keywords:* abrasive ceramic material, micro-arc oxidation, aluminum oxide modifications, friction, wear.

### REFERENCES

1. Bushlya V., Lenrick F., Gutnichenko O., Petrusha I., Osipov O., Kristiansson S., Stahl J. E. Performance and wear mechanisms of novel superhard diamond and boron nitride-based tools in machining Al-SiCp metal matrix composite. *Wear*. 2017. V. 376, pp. 152–164.
2. Guo L., Zhang X., Chen S., Hui J. An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools. *Materials*. 2019. V. 12. No 1, p. 125.
3. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Romashov D.V., Fedorenko D.O. Principles of 3D modelling of the production and application of diamond composite materials. *Nanotechnology Perceptions*. 2012. No. 8 (2), pp. 132–138.
4. Vityaz P.A., Senyut V.T. Synthesis and use of nanostructural supersolid materials of tool appointment. *Vesci Nacyyanalnaj akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnyh navuk*. 2015. No. 3, pp. 60–76. (In Russian).
5. Loginov P., Mishnaevsky L., Levashov E., Petrzhek M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performance: Development, testing and modelling *Materials and Design*. 2015. No. 88, pp. 310–319.
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Hard lubricant ceramic coatings with nano- and microdispersed filler. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. 2018. V. 10, pp. 150–158. (In Russian).
7. Sudnik L.V., Vityaz P.A., Ilushchenko A.F. Almazosoderzhashchie abrazivnye nanokompozity [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk: Belarusky navuka, 2012. 319 p.
8. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Ohmori H. Abrasives and abrasive tools. In *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Elsevier. 2013, pp. 243–311.

9. Kunimine T., Shibuya M., Sato H., Watanabe Y. Fabrication of copper diamond functionally graded materials for grinding wheels by centrifugal sintered – casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. No. 217, pp. 294–301.
10. Clark W. I., Shih A. J., Hardin C. W., Lemaster R. L., McSpadden, S. B. Fixed abrasive diamond wire machining - Part I: Process monitoring and wire tension force. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. No. 43 (5), pp. 523–532.
11. Vinokurov G.G., Struchkov N.F. Wear resistance of grinding wheels from diamond-containing materials for instrumental purposes. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2004. V. 7. No. S1-1, pp. 430-432. (In Russian).
12. Bolotov A, Novikova O, Novikov V. Synthesis and friction properties of a multifunctional diamond-containing ceramic material. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19, pp. 2449–2453.
13. 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. № 12, pp. 80–87. (In Russian).
14. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. No. 389(1–2), pp. 169–176.
15. Qin D., Xu G., Yang Y., Che S. Multiphase Ceramic Coatings with High Hardness and Wear Resistance on 5052 Aluminum Alloy by a Microarc Oxidation Method. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2018. No. 6 (2), pp. 2431–2437.
16. Xue W., Wu X., Li X., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006. No. 425(1–2), pp. 302–306.
17. Polubelova A.S., Krylov V.N., Karlin, Efimova I.S. Proizvodstvo abrazivnykh materialov [Production of abrasive materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1968. 180 p.
18. Bolotov A. N., Novikov V. V., Novikova O. O. The dependence of the wear of the friction couple composite diamond-bearing material – ceramic. *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).
19. GOST 14706-78 Almazы i instrumenty almaznye. Terminы i opredeleniya (s Izmeneniem N 1): [State Standard 14706-78. Diamonds and diamond tools. Terms and definitions (with Change N 1)]. Moscow: Standartinform, 1985. 11 p.
20. Markov M. A., Bykova A.D., Krasikov A.V., Farmakovskii B.V., Gerashchenkov D.A. Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. No. 59 (2), pp. 207–214.

Поступила в редакцию/received: 28.05.2020; после рецензирования/reviced: 15.07.2020;  
принята/accepted 29.07.2020