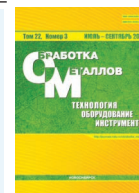




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства

Александр Болотов^а, Владислав Новиков^{б, *}, Ольга Новикова^с

Тверской государственный технический университет, наб. Афанасия Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0003-4054-5550>,  alniblvtov@rambler.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0001-5670-1250>,  vnnkv@yandex.ru,
^с  <https://orcid.org/0000-0003-4133-3541>,  onvk@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.893

История статьи:

Поступила: 08 апреля 2020
 Рецензирование: 16 апреля 2020
 Принята к печати: 02 июня 2020
 Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Минералокерамический
 композиционный материал
 Микродуговое окисление
 Антифрикционные свойства
 Абразивные свойства
 Трение
 Износ

АННОТАЦИЯ

Введение. Состав и строение минералокерамических композиционных материалов оказывают большое влияние на их физико-механические и триботехнические свойства. Несмотря на большое их разнообразие, некоторые из них не имеют высоких триботехнических характеристик. Поэтому разработка технологии получения новых минералокерамических композиционных материалов является актуальной задачей. Предложено разработать основы технологии получения нового минералокерамического материала методом микродугового окисления спечённой алмазно-алюминиевой заготовки. Материал представляет собой матрицу из оксида алюминия и дисперсных включений металлизированного медью алмаза. Технологические особенности его получения и триботехнические характеристики еще недостаточно изучены. **Цель работы:** отработать этапы синтеза нового минералокерамического композиционного материала, исследовать его фрикционные свойства и установить область рационального применения. **В работе исследованы** режимы прессования, спекания заготовки и дальнейшего микроплазменного синтеза минералокерамического материала с различной относительной плотностью образцов, концентрацией и дисперсностью алмазов, степенью их металлизации медью. Исследованы триботехнические свойства полученных материалов. **Методами исследования** являются компрессионные испытания, исследования поверхности материала, сравнительные фрикционные испытания. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что основными факторами, определяющими работоспособность изделия, являются: относительная плотность образцов, степень металлизации алмазов медью и концентрации щелочи в электролите. Зернистость алмазов оказывает определяющее влияние на триботехнические характеристики и область практического применения минералокерамики. Материалы с зернистостью алмазов более 28/20 показали высокие режущие характеристики и хорошее алмазоудержание. Объемная режущая способность – выше традиционных аналогов и не снижается с течением времени. Триботехнические испытания керамических материалов с зернистостью алмазов менее 20/14 показали наличие у них хороших антифрикционных свойств даже в отсутствие смазочных сред. Интенсивность изнашивания антифрикционной минералокерамики сравнима, а коэффициент трения существенно ниже, чем у окисленного сплава Д16. Предложен критерий в виде критического номинального давления, определяющего переход от преимущественно упругого контакта к хрупкому разрушению антифрикционного минералокерамического материала. Созданные минералокерамические материалы с высокой зернистостью алмазов перспективно использовать в качестве инструментальных для прецизионной абразивной микрообработки твердых материалов. Из керамических материалов с малой зернистостью алмазов целесообразно изготавливать детали узлов трения, работающих в условиях дефицита смазочного материала.

Для цитирования: 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. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-59-68.

*Адрес для переписки

Новиков Владислав Викторович, к.т.н., доцент
 Тверской государственный технический университет,
 наб. А. Никитина, 22,
 170026, г. Тверь, Россия
 Тел.: 8 (482) 278-88-80, e-mail: vnnkv@yandex.ru

Введение

Интенсификация машиностроительного производства диктует необходимость создания и внедрения новых современных материалов и технологических процессов для их обработки. Минералокерамические композиционные материалы, основу которых составляют оксиды

алюминия Al_2O_3 , являются одними из наиболее перспективных для изготовления высокопроизводительного режущего инструмента [1–3]. Однако высокая твердость, тепло- и износостойкость в данных материалах сочетаются с низкой прочностью на изгиб и хрупкостью. Для улучшения триботехнических свойств минералокерамики в нее вводят металлические добавки в виде карбидов вольфрама, молибдена и другие, что снижает теплостойкость материала. [4].

Алмазы, обладающие уникальным комплексом триботехнических свойств, успешно применяются в качестве наполнителя режущих абразивных инструментов. Кроме того, дисперсный порошок алмаза детонационного синтеза нашел применение в качестве компонента антифрикционных композиций [5–7]. Совместить в одном композиционном материале матрицу из твердого и износостойкого оксидного материала и алмазные зерна не представлялось возможным из-за отсутствия методов инкорпорирования алмазов. В частности, это объясняется тем, что температура спекания алмазонасных композиций лимитирована температурой графитизации алмазов.

Нами проведены исследования, направленные на получение нового минералокерамического материала с широким спектром фрикционных свойств. Использование микродугового оксидирования (МДО) [8, 9] поверхности спеченных деталей из композита, содержащего алюминиевую матрицу и мелкодисперсный алмаз в качестве наполнителя, получен композиционный материал, представляющий собой тугоплавкую керамическую связку из оксида алюминия, в которую внедрены частицы алмаза. Многовариантность физико-механических свойств композита, определяемая совокупностью характеристик матрицы и наполнителя, позволит получать уникальные материалы, которые могут быть использованы как в узлах трения различного назначения, так и в качестве режущего инструмента [10–12]. Технологические особенности получения спеченной алюминиевой заготовки и процесса формирования оксидного слоя, а также триботехнические характеристики новых минералокерамических материалов еще недостаточно изучены.

Известные керамические материалы, сформированные методом МДО в виде покрытия

на поверхности вентильных металлов, характеризуются высокой износостойкостью и низким значением коэффициента трения в присутствии смазочных сред [13, 14]. Однако небольшая толщина материала накладывает ограничения на срок службы трибоузлов, в которых они применяются. Кроме того, процесс образования покрытия весьма энергоемок и длителен.

Цель исследования. Отработать этапы синтеза нового минералокерамического композиционного материала, исследовать его фрикционные свойства и установить область его рационального применения.

Методика исследований

Для изготовления композиционного минералокерамического материала использовалась алюминиевая пудра ПАП-1 (ГОСТ 5494–95), синтетические алмазы марки АС6 (ГОСТ 9206–80), медь, сформированная методом химического осаждения на поверхности алмазов.

Оксидирование спеченного образца проводили на оборудовании, включающем в себя: источник питания; гальваническую ванну с рубашкой охлаждения; компрессор для сжатого воздуха; вытяжную вентиляцию; дистиллятор. Формирование материала проводилось в электролите – едкий натрий $NaOH$ (0,5...3 г/л), жидкое стекло Na_2SiO_3 (6 г/л) при плотности тока 10 А/дм².

Фрикционные характеристики получаемых образцов исследовались на машине трения МТ-2 [11], реализующей схему палец–кольцо. Относительный расход алмазов J_a композиционного минералокерамического материала, характеризующий износостойкость материала, при испытаниях в режиме абразивного инструмента определялся как отношение массы алмазов, находившихся в изношенном алмазонасном слое, к массе изношенного материала контртела (ГОСТ 14706–78) [15]. В качестве сопоставляемых материалов были выбраны алмазосодержащие абразивные материалы, традиционно выпускаемые промышленностью: с металлической матрицей – М1 (смазочная жидкость – электрол) и органической бакелитовой матрицей – Б1. Для образцов с керамической и органической матрицей смазкой была техническая вода. Материал контробразца – керамика состава $BaO-SiO_2-Al_2O_3$ твердостью 16 ГПа.

Сравнительные испытания композиционных материалов, обладающих антифрикционными свойствами, проводились в сопоставлении с образцами из сплава Д16, модифицированными МДО. Контробразцы также изготовлены из Д16 и упрочнены МДО. Оценивались: коэффициент трения и интенсивность линейного износа при различном номинальном давлении в контакте в присутствии технической воды и без смазочного материала.

Результаты и их обсуждение

Технология получения образцов из композиционного минералокерамического материала

В процессе формирования заготовки минералокерамического материала методом порошковой металлургии исходные компоненты смешивали между собой, загружали в пресс-форму, подвергали холодному брикетированию и спеканию в муфельной печи в условиях вакуума при температуре 570...575 °С в течение 30...40 мин.

С целью предотвращения каталитического фазового превращения алмаза в графит под действием кислорода в процессе спекания композиции и синтеза покрытия в плазме электрического разряда применялась химическая металлизация алмаза медью [16]. Кроме того, медь в небольших количествах в алюминиевых сплавах при микродуговом окислении выступает в качестве катализатора, способствующего образованию наиболее износостойкой и твердой фазы α -оксида алюминия микротвердостью около 24 ГПа.

Одной из основных характеристик, определяющих физико-механические и триботехнические свойства минералокерамического материала и определяющей его пористость, является относительная плотность Q [17]. Установлено, что при увеличении давления прессования в рассматриваемом диапазоне от 50 до 300 МПа относительная плотность образцов возрастает в 1,2...1,4 раза в зависимости от зернистости алмазов. Спекание заготовки позволяет повысить их прочность и относительную плотность дополнительно на 5...7 %. С увеличением степени металлизации алмазов M относительная плотность заготовки может снижаться до 10...15 %. При снижении зернистости алмазов d после прессования и спекания получается композиционный

материал с большей относительной плотностью. Например, для зернистости алмазов 20/14 достигается относительная плотность 97 % при давлении прессования 250 МПа, температуре 650 °С. Возможность регулировать пористость заготовки позволяет влиять на характер протекания процесса микродугового окислирования.

Спеченный образец из композиционной смеси модифицировался методом МДО, при этом на его поверхности формировался упрочненный слой из керамической матрицы и равномерно заключенного в ней дисперсного алмаза. Технологический процесс микродугового окислирования детали из спеченной алмазно-алюминиевой смеси имеет ряд особенностей по сравнению с алюминиевыми сплавами, обусловленных повышенной пористостью исходного материала (до 10...15 об.%), наличием в составе смеси диэлектрических составляющих: оксида алюминия (до 10 % от массы алюминиевой составляющей) и дисперсных частиц алмаза (до 35 об.%), на поверхности которых находится медь.

Наиболее существенное влияние на ход процесса МДО минералокерамической композиции оказывает степень металлизации алмазных зерен M (рис. 1). Время выхода на режим

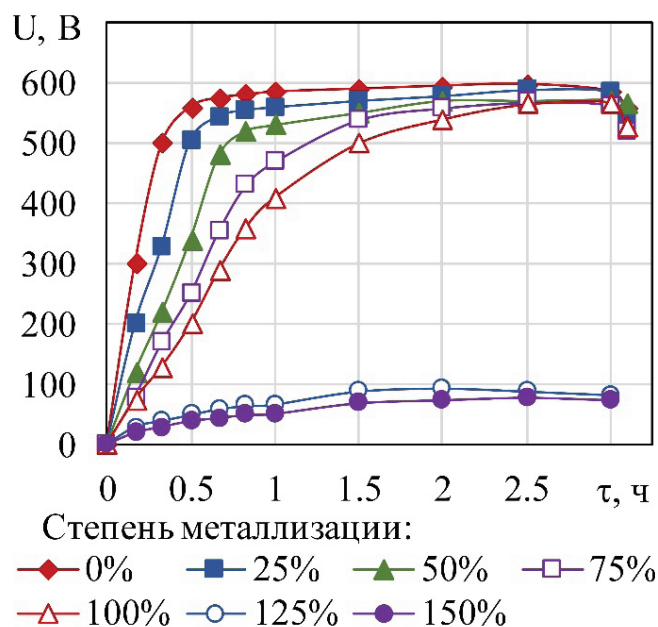


Рис. 1. Хронограмма напряжения МДО образцов ($d = 63/50$, $Q = 90$ %, $K = 100$ %) с различной степенью металлизации алмазов

Fig. 1. A voltage chronogram of microarc oxidation of blanks ($d = 63/50$, $Q = 90$ %, $K = 100$ %) with a varying degree of diamond metallization

устойчивого оксидирования (линейный участок кривых) при увеличении степени металлизации существенно возрастает, и при металлизации алмазных зерен свыше 125 % искрения на поверхности детали не возникает. Это ведет к возникновению больших токов утечки и образованию обширных очагов электрохимической коррозии. Установлено, что с увеличением концентрации алмазов K от 25 до 100 % возрастает время выхода на режим искрения, но ход процесса МДО существенно не меняется. Следовательно, в этом диапазоне степень концентрации алмазов можно выбрать исходя из обеспечения необходимых триботехнических свойств материала.

У спеченных алмазно-алюминиевых смесей время выхода на период стабильного анодирования увеличивается по сравнению с обычными беспористыми алюминиевыми сплавами. Но процесс оксидирования происходит интенсивнее, и формирование керамического слоя заканчивается в 1,5 раза быстрее благодаря большей площади активной поверхности, обусловленной пористостью спеченных алюминиевых порошков.

Установлено, что толщина керамического слоя, сформированного на поверхности спеченных алмазно-алюминиевых деталей, выше в несколько раз (рис. 2) по сравнению с толщиной,

полученной на алюминиевых сплавах, причем наибольшее влияние на нее оказывают концентрация щелочи в электролите и относительная плотность спеченной заготовки. Максимум толщины керамического покрытия независимо от концентрации алмазов достигается при концентрации щелочи в электролите примерно 2 г/л (рис. 2, а). Это объясняется возрастанием проводимости за счет наличия достаточного числа ионов гидроксида натрия в электролите, способных проникнуть в поры материала. При увеличении концентрации NaOH мощность искровых разрядов возрастает, возникают локальные единичные дуговые разряды, которые разрушают керамический слой.

Экстремальный характер имеет зависимость толщины покрытия от относительной плотности композита Q (рис. 2, б). При Q меньше 75 % прочность ее невысока, и в процессе МДО такие покрытия подвержены саморазрушению из-за воздействия среды электролита и высокотемпературных электрических разрядов. Максимум толщины покрытия достигается при плотности, равной 80...90 %, при дальнейшем увеличении плотности заготовки свыше 90% толщина покрытия снижается, что вызвано затруднением доступа электролита в глубь материала и сокращением активной поверхности за счет уменьшения пористости.

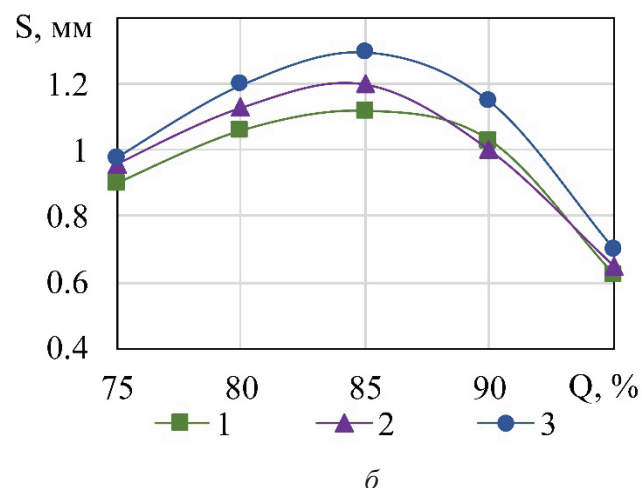
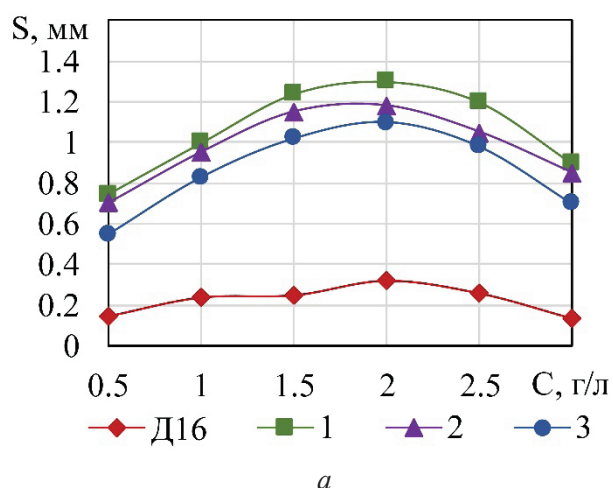


Рис. 2. Влияние концентрации C щелочи в электролите (а) ($d = 63/50$, $Q = 85\%$) и относительной плотности Q композиционного материала (б) ($d = 63/50$, $C = 2$ г/л) на толщину S формируемого покрытия. K :

1 – 50 %; 2 – 75 %; 3 – 100 %

Fig. 2. The effect of C alkali concentration in the electrolyte (a) ($d = 63/50$, $Q = 85\%$), and relative density Q of a composite material (б) ($d = 63/50$, $C = 2$ g/l) on S thickness of the formed coating. K :

1 – 50 %; 2 – 75 %; 3 – 100 %

Результаты сравнительных триботехнических испытаний минералокерамического материала

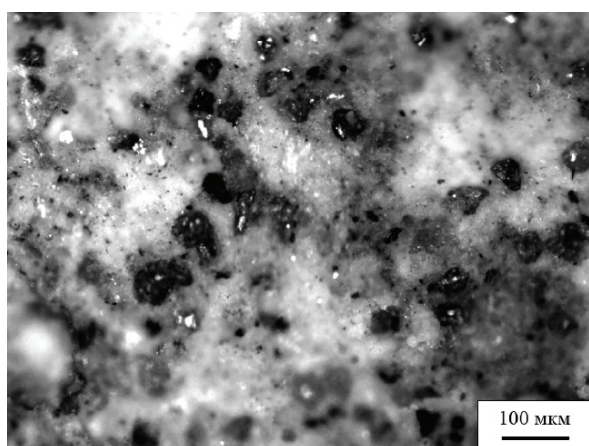
В процессе триботехнических испытаний установлено, что если применять разработанную технологию, можно получить минералокерамические материалы с качественно разными триботехническими свойствами.

Композиционные материалы, содержащие алмазные зерна зернистостью $\gg 28/20$, обладают высокими режущими характеристиками и способны интенсивно изнашивать контробразец. Для данных инструментальных минералокерамических материалов проведены сравнительные фрикционные испытания на машине трения МТ-2 по определению характеристик абразивного износа.

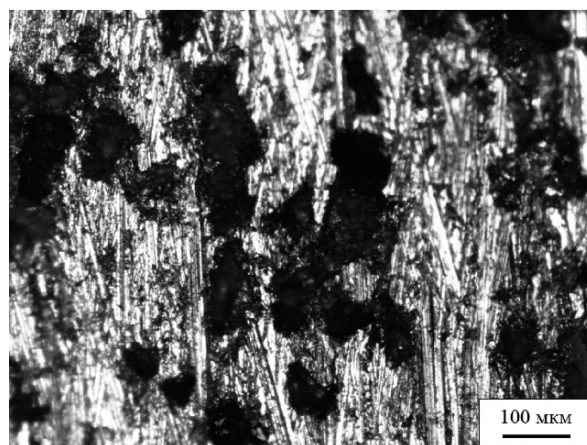
Установлено, что величина относительного расхода алмаза материала с керамической матрицей на основе оксида алюминия при одинаковых условиях трения существенно ниже, чем у материалов на металлической и органической связке (рис. 3, а). Зернистость алмазов наиболее существенно влияет на объемную режущую способность композиционных алмазосодержащих материалов (рис. 3, б). Высокие режущие свойства минералокерамического материала объясняются значительной твердостью материала керамической матрицы Al_2O_3 , которая обладает повышенным сопротивлением к абразивному воздействию со стороны керамического контробразца

и отделившихся керамических частиц износа. Нелинейное возрастание режущей способности обусловлено изменением топографии рабочей поверхности инструмента. Алмазы малой зернистости незначительно выступают над материалом матрицы, принимающей часть нагрузки в процессе абразивного износа. При увеличении зернистости алмазов их вылет над керамической связкой возрастает, и объем деформированного материала контртела растет.

Продолжительные испытания объемной режущей способности абразивного инструмента из минералокерамического материала показали, что она практически не зависит от времени (снижение на 4...6 % в течение 20 мин работы). Можно предположить, что керамическая матрица инструментального материала, созданная из различных модификаций оксида алюминия, обладает помимо высокой твердости хорошей алмазостойкостью, что обеспечивает соизмеримую скорость изнашивания алмазов и матрицы. В процессе резания изношенные алмазные зерна выкрашиваются вместе с частью окружающей их матрицы, обнажая новые зерна, что обеспечивает поддержание стабильной режущей способности инструмента и реализацию режима самозатачивания. На поверхности минералокерамического материала после абразивных испытаний отсутствуют выраженные следы абразивного износа (рис. 4, а), нет признаков «засаливания» режущих кромок алмазов. На ме-



а



б

Рис. 4. Поверхность трения композиционных алмазосодержащих материалов после абразивного износа ($Q = 85\%$, $M = 75\%$):

а – керамическая матрица, $d = 80/63$, $K = 75\%$; б – металлическая матрица, $d = 80/63$, $K = 75\%$

Fig. 4. A friction surface of composite diamond-bearing materials after abrasive wear ($Q = 85\%$, $M = 75\%$):

а – ceramic matrix, $d = 80/63$, $K = 75\%$; б – metal matrix, $d = 80/63$, $K = 75\%$

таллической матрице видны глубокие царапины, оставленные твердым материалом контробразца (рис. 4, б). Положительную роль играет высокая теплопроводность алюминиевой подложки, которая обуславливает хороший отвод из тепла из зоны трения и препятствует негативной графитизации алмазных зерен под воздействием высоких температур в процессе резания.

Радикально другими фрикционными свойствами обладает минералокерамический материал, содержащий фракции алмаза зернистостью $< 20/14$. Установлено, что полученный материал имеет ярко выраженные антифрикционные характеристики даже в отсутствие жидких смазочных материалов.

Интенсивность изнашивания антифрикционной минералокерамики сравнима, а коэффициент трения существенно ниже, чем у оксидированного сплава Д16 (рис. 5).

Оксидный материал с алмазным наполнителем имеет достаточно низкое значение коэффициента трения в условиях отсутствия смазочного материала (рис. 5, в), что обуславливается наличием в его составе включений свободного графита, играющего роль твердой смазки, и образовавшимся при частичном фазовом окислении алмаза. Графит, окружающий зерна алмазов, разрушается на вершинах выступов, но из зоны трения не удаляется, а намазывается на контактирующие поверхности.

Немонотонный характер трибозависимостей, приведенных на рис. 5, позволяет предположить изменение вида изнашивания керамических материалов при увеличении нагрузки: от усталостного к хрупкому износу поверхности трения [18]. Область рационального применения антифрикционной минералокерамики необходимо ограничить преимущественно упругим дефор-

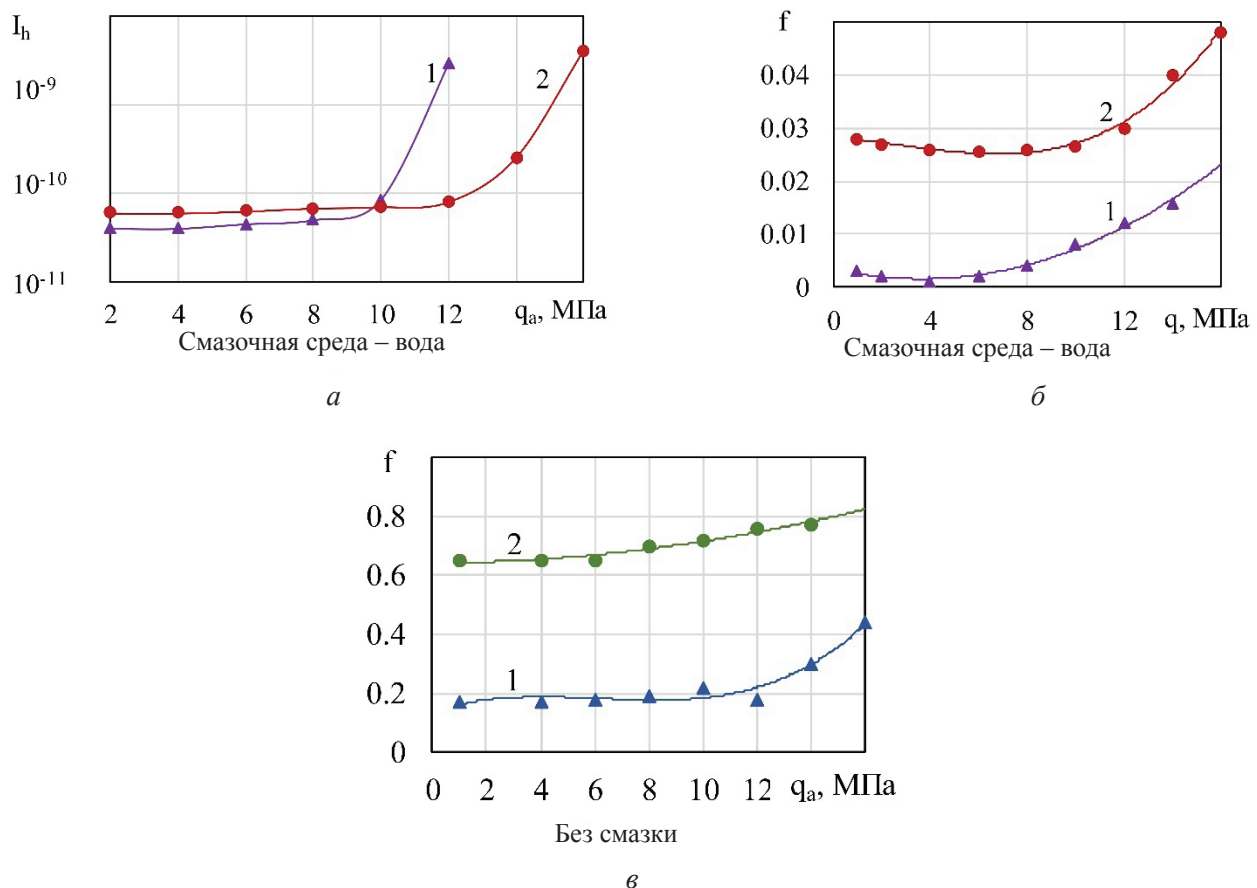


Рис. 5. Влияние давления на интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения (б) и (в): 1 – минералокерамический материал ($Q = 85\%$, $S = 1,2$ мм); 2 – МДО Д16. Линейная скорость скольжения 0,75 м/с

Fig. 5. The effect of pressure on the wear rate (а) and on the friction coefficient (б) and (в): 1 – is a mineral ceramic material; 2 – is D16 microarc oxidation. A linear sliding speed is 0.75 m/s

мированием и усталостным разрушением субмикрослоев трущихся поверхностей при реальном трибоконтакте.

В качестве критерия, определяющего переход от преимущественно упругого контакта к хрупкому разрушению керамического материала, принята нагрузка, создающая среднее упругое давление на пятне контакта, равное микропрочности материала σ [19]. Переход от нагрузки на единичном пятне контакта σ к величине критического номинального давления $q_{кр}$ в зоне реального трибосопряжения произведен согласно модели Н.Б. Демкина [20]. Поверхность композиционного материала моделировали набором сферических сегментов одинакового радиуса R , равного половине среднего характерного размера зерна алмаза d , причем зерна алмаза были распределены в материале с плотностью τ . Использовалось понятие эквивалентной поверхности [21], вершины микронеровностей которой распределены по степенному закону, а с учетом значительной толщины модифицированного слоя сочли возможным применить формулы Герца для описания характеристик контакта единичной микронеровности [22].

Для величины критического номинального давления q_{ax} , зависящего только от физико-механических свойств взаимодействующих поверхностей и параметров их микрогеометрии, получена зависимость

$$q_{ax} = \left(\frac{t_m \nu \sigma \pi^2}{2} \right)^{2\nu+1} \times \left[\frac{1,5\pi}{t_m \nu (\nu-1) K_3} \left(\frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{2\nu} \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)^{2\nu}.$$

Здесь R_p , ν , t_m , K_3 – параметры шероховатости контактирующих поверхностей [20, 21],

$$I_a = \frac{1-\mu_a^2}{E_a}, \quad I_c = \frac{1-\mu_c^2}{E_c}, \quad E_a, \quad E_c \text{ и } \mu_a, \quad \mu_c -$$

модули упругости и коэффициенты Пуассона алмаза и матрицы. Значения критического номинального давления, рассчитанные по предложенной формуле: МДО Д16 – 10,2 МПа, минералокерамика – 5,7 МПа. Расчетные значения несколько ниже экспериментальных данных (см. рис. 5). Это можно объяснить тем, что

при данном номинальном давлении в реальном трибоузле локальные хрупкие разрушения только начинают формироваться на единичных микронеровностях. Катастрофическое хрупкое разрушение керамического материала происходит при увеличении давления в 1,1...1,5 раза выше критического. Однако данный критерий может быть определяющим при выборе конструкции и рабочих нагрузок узла трения с антифрикционным минералокерамическим материалом.

Заключение

На основе оригинальной технологии созданы новые минералокерамические алмазосодержащие материалы двух типов: антифрикционные конструкционные материалы для узлов трения скольжения и инструментальные материалы для абразивной обработки.

Установлено, что минералокерамические материалы с высокой зернистостью алмазов перспективно использовать в качестве абразивного режущего инструмента. Наиболее востребованы они должны быть в качестве инструментальных для прецизионной абразивной микрообработки твердых материалов.

Исследование триботехнических свойств керамических материалов с малой зернистостью алмазов показало наличие у них хороших антифрикционных свойств даже без смазывания жидкими материалами. Низкое трение таких материалов объясняется наличием на поверхности графита, образованного за счет частичного полиморфного превращение алмазов. Из таких материалов целесообразно изготавливать детали узлов трения, работающих в условиях дефицита смазочного материала.

Список литературы

1. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al₂O₃ metal matrix composites / G.B.V. Kumar, C.S.P. Rao, N. Selvaraj, M.S. Bhagyashekar // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2010. – Vol. 9, iss. 1. – P. 43–55. – DOI: 10.4236/jmmce.2010.91004.
2. Composites based on aluminum-silicate glass ceramic with discrete fillers / L.A. Orlova, A.S. Chainikova, N.V. Popovich, Y.E. Lebedeva // Glass and Ceramics. – 2013. – Vol. 70, iss. 3–4. – P. 149–154. – DOI: 10.1007/s10717-013-9529-2.

3. Consolidation of aluminum-based metal matrix composites via spark plasma sintering / Sweet G.A., Brochu M., Hexemer R.L., Donaldson I.W., Bishop D.P. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 648. – P. 123–133. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.027.
4. Jessen, T., Ustundag, E., & ebrary Inc. 24th annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures A / January 23–28, 2000, Cocoa Beach, FL. Ceramic Engineering & Science Proceedings 21/3. Westerville, OH: American Ceramic Society. Retrieved from http://sk8es4mc2l.search.serialssolutions.com/?sid=sersol&SS_jc=TC0000715049&title=24th annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures January 23–28, 2000, Cocoa Beach, FL. A
5. Synthesis and properties of electroless Ni-P-Nanometer Diamond composite coatings / Xu H., Yang Z., Li M. K., Shi Y. L., Huang Y., Li H.L. // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 191, iss. 2–3. – P. 161–165. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.03.045.
6. Blum R., Molian P. Liquid-phase sintering of nanodiamond composite coatings on aluminum A319 using a focused laser beam // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 204, iss. 1–2. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.06.025.
7. Diamond powders less than 100 nm in diameter as effective solid lubricants in vacuum / A.V. Gubarevich, S. Usuba, Y. Kakudate, A. Tanaka, O. Odawara // *Japanese Journal of Applied Physics, Pt. 2: Letters*. – 2004. – Vol. 43, iss. 7A. – DOI: 10.1143/JJAP.43.L920.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2006. – № 3. – С. 13–16.
9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез и абразивные свойства алмазосодержащих материалов с керамической матрицей // *Трибология – машиностроению: XII Международная научно-техническая конференция, посвященная 80-летию ИМАШ РАН*. – М., 2018. – С. 74–76.
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*. – Тверь, 2017. – № 10. – С. 153–157.
12. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение: монография. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 381 с.
13. Formation of wear- and corrosion-resistant coatings by the microarc oxidation of aluminum / M.A. Markov, A.D. Bykova, A.V. Krasikov, B.V. Farmakovskii, D.A. Gerashchenkov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – Vol. 59, iss. 2. – P. 207–214. – DOI: 10.1007/s11148-018-0207-3.
14. Zlotnikov I.I., Shapovalov V.M. Improving the antifriction properties of ceramic coatings obtained by the method of MAO on aluminum alloys // *Journal of Friction and Wear*. – 2019. – Vol. 40, iss. 5. – P. 360–363. – DOI: 10.3103/S1068366619050222.
15. ГОСТ 14706–78. Алмазы и инструменты алмазные. Термины и определения (с Изменением N 1): дата введения 1979–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 11 с. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200009427> (дата обращения: 14.07.2020).
16. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов / Е.М. Чистяков, А.А. Шепелев, Т.М. Дуда, В.П. Черных. – Киев: Наукова думка, 1982. – 204 с.
17. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Горпиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Беллавин; под ред. М.Е. Смагоринского. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.
18. Крагельский И.В. О критериях износа материалов // *Доклады АН СССР*. – 1959. – Т. 129, № 5. – С. 1016–1019.
19. Крагельский И.В., Добычин М.Н. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
20. Демкин Н.Б. Свойства фрикционного контакта // *Трение и износ*. – 1982. – Т. 3, № 4. – С. 586–595.
21. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
22. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

Конфликт интересов

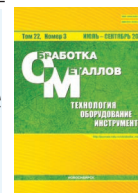
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Mineral Ceramic Composite Material: Synthesis and Friction Behavior

Aleksandr Bolotov ^a, Vladislav Novikov ^{b, *}, Olga Novikova ^c

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin Emb., Tver, 170026, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-4054-5550>,  alnikbltov@rambler.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-5670-1250>,  vnvkv@yandex.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0003-4133-3541>,  onvk@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08 April 2020

Revised: 16 April 2020

Accepted: 02 June 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

Mineraloceramic Composite Material

Microarc oxidation

Anti-friction properties

Abrasive properties

Friction

Wear

ABSTRACT

Introduction. The composition and structure of mineral ceramic composite materials affect its physico-mechanical and tribotechnical properties. Despite its wide variety, some part does not have high tribotechnical characteristics. Therefore, the development of a technology for producing new mineral ceramic composite material is a relevant objective. The paper proposes to develop the fundamentals of the technology for producing a new mineral ceramic material by microarc oxidation of sintered diamond-aluminum blank. The material consists of an aluminum oxide matrix and dispersed inclusions of copper metallized diamond. The technological characteristics of its production and tribotechnical characteristics are still understudied. **Work objective:** to work through the stages of synthesis of a new mineral ceramic composite material, to study its frictional properties and to determine the application area. **The paper studies** the modes of blank pressing, sintering and further microplasma synthesis of mineral ceramic material with different relative density of samples, diamond concentration and dispersion, its degree of copper metallization. Tribotechnical properties of the obtained materials are also investigated. **The research methods** are compression tests, material surface studies, and comparative friction tests. **Results and discussion.** It is revealed that the main factors that determine the product performance are: the relative density of samples, the degree of copper metallization of diamonds and alkali concentration in an electrolyte. The grain size of diamonds determines tribotechnical characteristics and the practical application of cermet. Materials with diamond grain size more than 28/20 showed high cutting characteristics and good diamond holding ability. The volumetric cutting ability is higher than traditional counterparts have, and it does not decrease over time. Tribotechnical tests of ceramic materials with diamond grain size less than 20/14 showed that it has good antifriction properties even without lubricating media. The wear rate of antifriction cermet is comparable to D16 oxidized alloy; its friction coefficient is significantly lower. The authors propose a criterion called a critical nominal pressure that determines the transition from a predominantly elastic contact to brittle fracture of a mineral ceramic material. The created mineral ceramic materials with high diamond grain size are promising as instrumental materials for precision abrasive microprocessing of hard materials. Ceramic materials with a small grain size of diamonds are good for producing parts of friction units operating under lubricant shortage.

For citation: Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Mineral ceramic composite material: synthesis and friction behavior. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 59–68. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-59-68. (In Russian).

References

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, vol. 9, iss. 1, pp. 43–55. DOI: 10.4236/jmmce.2010.91004.
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, vol. 70, iss. 3–4, pp. 149–154. DOI: 10.1007/s10717-013-9529-2.
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, vol. 648, pp. 123–133. DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.027.

* Corresponding author

Novikov Vladislav V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Tver State Technical University,
 22 Af. Nikitin Emb.,
 170026, Tver, Russian Federation
 Tel.: 8 (482) 278-88-80, e-mail: vnvkv@yandex.ru

4. Jessen, T., Ustundag, E., & ebrary Inc. 24th annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures A / January 23-28, 2000, Cocoa Beach, FL. *Ceramic Engineering & Science Proceedings 21/3*. Westerville, OH: American Ceramic Society. Retrieved from http://sk8es4mc2l.search.serialssolutions.com/?sid=sersol&SS_jc=TC0000715049&title=24th annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures January 23-28, 2000, Cocoa Beach, FL. A
5. 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, vol. 191, iss. 2–3, pp. 161–165. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.03.045.
6. Blum R., Molian P. Liquid-phase sintering of nanodiamond composite coatings on aluminum A319 using a focused laser beam. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 204, iss. 1–2, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.06.025.
7. 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, Pt. 2: Letters*, 2004, vol. 43, iss. 7A. DOI: 10.1143/JJAP.43.L920.
8. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Primenenie mikrodogovogo oksidirovaniya dlya polucheniya keramicheskogo almazosoderzhashchego materiala [Application of microarc oxidation for reception ceramic diamond-containing material]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2006, iss. 3, pp. 13–16.
9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. [Synthesis and abrasive properties of diamond-containing materials with ceramic matrix]. *Tribologiya – mashinostroeniye: XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 80-letiyu IMASH RAN* [Proceedings of XII International scientific conference “Tribology for Mechanical Engineering” dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS]. Moscow, 2018, pp. 74–76. (In Russian).
10. Sudnik L.V. Vityaz’ P.A., Il’yushchenko A.F. *Almazosoderzhashchie abrazivnye nanokompozity* [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 319 p.
11. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. [Dependence of friction pair wear composite diamond-containing material – ceramics]. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalei tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya* [Mechanics and physics of processes on the surface and in contact of solids, parts of technological and energy equipment]. Tver’, 2017, no. 10, pp. 153–157.
12. Vityaz’ P.A. *Nanoalmazy detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primeneniye* [Detonation synthesis nanodiamonds: production and use]. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2013. 381 p.
13. 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, vol. 59, iss. 2, pp. 207–214. DOI: 10.1007/s11148-018-0207-3.
14. Zlotnikov I.I., Shapovalov V.M. Improving the antifriction properties of ceramic coatings obtained by the method of MAO on aluminum alloys. *Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, iss. 5, pp. 360–363. DOI: 10.3103/S1068366619050222.
15. GOST 14706–78. *Almazy i instrumenty almaznye. Terminy i opredeleniya (s Izmeneniyem N 1)* [State Standard 14706–78. Diamonds and diamond tools. Terms and definitions (with Change N 1)]. Moscow, Standartinform Publ., 1985. 11 p. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200009427> (accessed 14.07.2020).
16. Chistyakov E.M., Shepelev A.A., Duda T.M., Chernykh V.P. *Instrument iz metallizirovannykh sverkh tverdykh materialov* [A tool made of metallized supersolid materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982. 204 p.
17. Gorpichenko V.G., Smagorinskii M.E., Grigor’ev A.A., Bellavin A.D. *Spechennyye materialy iz alyuminiyevykh poroshkov* [Baked materials from aluminum powders]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1993. 320 p.
18. Kragel’skii I.V. O kriteriyakh iznosa materialov [About material wear criteria]. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1959, vol. 129, no. 5, pp. 1016–1019.
19. Kragel’skii I.V., Dobychin M.N. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basics of friction and wear calculations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p.
20. Demkin N.B. Svoistva friktsionnogo kontakta [Friction contact properties]. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 1982, vol. 3, iss. 4, pp. 586–595. (In Russian).
21. Demkin N.B., Ryzhov E.V. *Kachestvo poverkhnosti i kontakt detalei mashin* [Surface quality and contact of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 244 p.
22. Johnson K.L. *Contact mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985 (Russ. ed.: Dzhonson K. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya*. Moscow, Mir Publ., 1989. 510 p.).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).