

1980. - 187 с.

12. Зиновьев, Е.В. Полимеры в узлах трения машин и приборов / Е.В. Зиновьев, А.Л. Левин. - М.: Машиностроение, 1988. - 167 с.

13. Федорченко, И.М. Исследование материалов для тормозных и передаточных устройств / И.М. Федорченко, Д.Я. Ровинский. - Киев: Наукова думка, 1976. - 240 с.

14. Kobishanov, V.V. Passenger Car Safety Prediction / V.V. Kobishanov, V.P. Lozbinev, V.I. Sakalo, D.Ya. Antipin, S.G. Shorohov, A.M. Vysocky // World Applied Sciences Journal. - 2013. - P. 208-212.

15. Трение и износ в машинах: практикум для студентов технических специальностей / П. Н. Богданович [и др.]; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. - Гомель: БелГУТ, 2014. - 134 с.

E.V. Lukashova¹, N.A. Lukashov¹, D.Ya. Antipin¹, M.A. Izmerov¹

¹Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russia, leno4kachepikova@gmail.com

SELECTION OF COMPOSITE MATERIAL FOR SUPPORTING SURFACES OF BOLLEY SLIDERS AND CAR BODY TO ENSURE COMPATIBILITY OF FRICTION PAIRS

Abstract

The paper discusses methods for optimizing the selection and use of friction materials in the friction units of the bearing surfaces of the bogie slides and the car body. The method of neurocomputer modeling was chosen as the main one. Based on calculations obtained by this method, as well as scanning in the area of minimal wear by approximation, predicted and control values of the concentration of the main components of the composition of the friction cermet material were obtained. The physical, mechanical and tribological characteristics of the proposed composition of the metal-ceramic material have been determined.

Keywords: friction material, friction unit, wear, metal-ceramic material, tribological characteristics

УДК 621

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-242

О.О. Новикова, В.В. Новиков, А.Н. Болотов
Тверской государственный технический университет
Тверь, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННОЙ АЛМАЗОСодЕРЖАЩЕЙ МИНЕРАЛОКЕРАМИКИ

Аннотация

Теоретически и экспериментально исследованы триботехнические свойства композиционного материала, полученного из алюминиевой пудры и микродисперсного алмаза методом порошковой металлургии с последующей модификацией поверхности микроплазменным электролитическим окислением. Предложена модель контактного взаимодействия

алмазосодержащей минералокерамики и керамики в широком диапазоне нагрузок. Получены соотношения для расчета коэффициента трения и критического давления соответствующего изменению вида деформирования композиционного материала.

Ключевые слова: алмазосодержащая минералокерамика, антифрикционные свойства, модель контактного взаимодействия, микропрочность, трение, износ.

Введение

Одним из направлений создания инновационных трибоузлов является применение керамических элементов в качестве деталей, участвующих в непосредственном фрикционном контакте. Высокие триботехнические свойства керамики дополняются уникальными температурными, антикоррозионными, электротехническими характеристиками. Особенно перспективны керамические композиционные материалы, в которых высокопрочные, износостойкие свойства матрицы дополнены характеристиками абразивных или антифрикционных наполнителей [1, 2].

Для композиционных материалов узлов трения, работающих в условиях дефицита смазочного материала, в качестве наполнителей имеющих низкое сопротивление сдвигу, традиционно применяются графит, дисульфид молибдена или полимерные материалы. В научных исследованиях последних лет особое внимание уделяется другой аллотропной форме графита – алмазу в качестве антифрикционного компонента керамической матрицы [3-7]. Большинство авторов подчёркивают сложность формирования оксидных минералокерамических алмазосодержащих материалов, обусловленную чувствительностью алмаза к окислению при относительно высоких температурах. Однако контролируемая степень графитизации алмаза при получении композита и в процессе трения приводит к синергетическому эффекту создания высокотвердой и износостойкой трибоповерхности с заданным градиентом фрикционных свойств [3, 5].

В результате проведенных нами исследований получен минералокерамический материал, представляющий собой матрицу из оксидов алюминия α -, β -, и γ - модификаций, в которую инкорпорированы дисперсные зерна алмаза [8, 9]. Разработана технология, согласно которой на первом этапе получения материала заготовка из дисперсных алюминия и алмаза спекается, и затем ее поверхностный слой модифицируется методом микроплазменного электролитического оксидирования. Сформированная деталь сочетает физико-механические свойства алюминиевой матрицы – основы и триботехнические свойства керамического упрочненного слоя с частично графитизированными дисперсными алмазами. Получены предварительные результаты, о том что при легировании керамической основы алмазами с зернистостью $< 20/14$, минералокерамический материал обладает хорошими антифрикционными свойствами в условиях дефицита смазочного материала или даже при его отсутствии [8].

Имеются некоторые результаты показывающие, что полученный алмазосодержащий минералокерамический материал (АМК) имеет стабильно низкие значения трибопараметров в достаточно большом диапазоне давлений, но при дальнейшем возрастании контактного давления интенсивность изнашивания резко возрастает. Аналогичные выводы получены для композиционных покрытий, упрочненных синтетическими алмазами и электрокорундом [10], и алмазоподобных покрытий [11]. Можно предположить, что при определенных нагрузках происходит

изменение вида износа материалов данного типа. Установление области рациональных нагрузок для минералокерамических материалов узлов сухого трения позволит значительно продлить безаварийный период эксплуатации трибоузлов.

Анализу изнашивания керамических материалов посвящено достаточно много исследований [12-15]. Наиболее общепринятые теоретические модели построены на основе линейной механики упругого разрушения и статистики Вейбулла [12, 13, 16, 17]. В значительно меньшей степени изучена природа износа керамических алмазосодержащих материалов [18-21]. Это объясняется тем, что технологии получения алмазной минералокерамики инновационны, фрикционные характеристики композиционного материала определяются эмерджентностью составляющих его структурных компонентов. Результаты работы [18] показывают линейно-упругий характер износа алмазосодержащих керамических инструментов, а также адекватность и корректность механизма усталостного разрушения и износа для рабочего слоя материалов данного типа. Упругое взаимодействие является наиболее типичным механизмом, даже в случае расчета параметров алмазно-абразивной обработки [18, 21]. В зависимости от свойств матрицы и материала контрповерхности предлагается применять математические модели для упругого, хрупкого или упругопластического контакта, с применением критериев перехода от одного вида взаимодействия к другому. Проведенный нами анализ морфологии трибоповерхности минералокерамического материала (контробразец-керамика) после испытаний: в установившемся режиме и в зоне закритического нагружения не выявил следов пластической деформации [8, 22]. Можно предположить, что в процессе трения упругий характер деформирования материала сменяется его хрупким разрушением, с одновременным удалением алмазных зерен с частью окружающей их керамической матрицы.

Для материалов, подверженных хрупкому разрушению, в том числе алмазосодержащих композиционных материалов с керамической матрицей, в качестве критических напряжений используются предел прочности на изгиб, микротвердость, микротвердость или микропрочность и др. [12, 18, 23, 24]. Для композиционных материалов необходимо учитывать влияние размерного эффекта дискретных составляющих на микромеханические свойства. В работе [23] показана правомерность применения прочностных характеристик, полученных индентированием с помощью микротвердомера для описания свойств материалов с дискретностью частиц от 250 до 400 мкм. Там же отмечена большая информативность показателя микропрочность для оценки зоны хрупкого разрушения.

В работе [22], нами предложена модель упругого контактного взаимодействия поверхностей материалов: минералокерамика-керамика, но деформационные процессы в случае хрупкого разрушения пока не исследованы. Также необходимо провести дополнительные триботехнические испытания для подтверждения правомерности выбранных моделей и сделанных допущений.

Цель исследования: на основе модели контактного взаимодействия между парой материалов алмазосодержащая минералокерамика – керамика оценить свойства трибоконтакта в широком диапазоне нагрузок.

Постановка задачи

При расчете фрикционных параметров будем, использовать молекулярно-механическую теорию трения [25, 26]. В модели должны быть учтены физико-

механические свойства материалов алмазосодержащая минералокерамика – керамика, их микрогеометрия и условия нагружения. Предположим, что характер контакта микронеровностей после приработки в установившемся режиме – линейно-упругий. При критическом превышении нагрузки преобладает хрупкое разрушение минералокерамического материала.

В качестве критерия, определяющего изменение характера деформирования примем нагрузку, создающую среднее упругое давление на пятне контакта, равное микропрочности материала σ [23]. Микропрочность соответствует напряжению необходимому для образования единицы площади хрупкого разрушения.

Будем рассматривать контактное взаимодействие шероховатого полупространства из керамической матрицы с распределенными в ней зернами алмаза с объемной плотностью τ и шероховатого полупространства контробразца (рис.1). Размер алмазных зерен сопоставим с микронеровностями матрицы, что позволяет моделировать поверхность композиционного материала в виде сферических сегментов одинакового радиуса R [25, 27]. Введем понятия эквивалентная поверхность, опорная кривая. Учитывая толщину алмазосодержащего керамического слоя, влияние материала подложки можно не учитывать и применять формулы Герца [28], для определения характеристик контакта единичной микронеровности. Будем считать, что взаимное влияние микронеровностей пренебрежимо мало [25, 26].

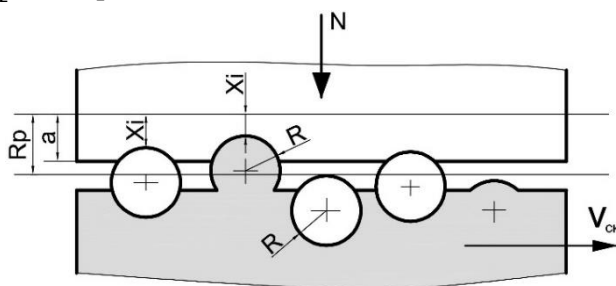


Рисунок 1 – Схема контакта шероховатого полупространства из керамической матрицы с распределенными в ней зернами алмаза

Метод решения

Нагрузка в зоне контакта складывается из нормальных усилий, воспринимаемых неровностями матрицы и выступающими зернами алмаза:

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

$$n(x) = \frac{t_m \nu A_a}{2p R R_p^\nu} x^{\nu-1}.$$

Здесь $N_{i\text{ак}}(a_i)$ и $N_{i\text{ск}}(a_i)$ – нагрузка, действующая на зерно алмаза и микронеровность матрицы; $n(x)$ – функция распределения выступов показывающая число выступов, вершины которых расположены выше уровня x ; ν, R_p, t_m – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [25, 27], A_a – номинальная площадь контакта. Учитывая, что $a_i = a - x$, а также применяя формулы Герца для определения характеристик упругого контакта единичных сферических неровностей получим формулу для расчета номинального давления в зоне упругого контакта:

$$q_{ay} = \frac{N}{A_a} = \frac{t_m \nu (\nu - 1) a^{\nu+0,5} K_3}{1,5 p R R_p^\nu} \left(\frac{\tau}{I_a} + \frac{(1 - \tau)}{I_c} \right). \quad (2)$$

Здесь K_3 – коэффициент, характеризующий опорную кривую [27]; $I_a = \frac{1-\mu_a^2}{E_a} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$, $I_c = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$ – упругие постоянные контакта алмаз-контробразец, связка-контробразец; E_a , E_c , E_k – модули упругости материалов алмаза, матрицы и контробразца, μ_a , μ_c , μ_k – коэффициенты Пуассона материалов алмаза, керамической матрицы (связки) и контробразца. Упругое сближение контактирующих поверхностей выразим из формулы (2):

$$a_y = R_p \left[\frac{1,5\pi q_a I_e}{t_m \nu (\nu - 1) K_3} \left(\frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{\nu+0,5}}, \quad (3)$$

где $I_e = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная.

Нагрузка на единичную микронеровность при давлении на нее равном микропрочности, согласно соотношениям Герца, определяется как:

$$N_i = a_i R \sigma \pi.$$

Далее, распространив решение на множественный контакт шероховатых поверхностей, проведя анализ аналогичный приведенному выше, найдем величину критического номинального давления как функцию сближения:

$$q_{ax} = \frac{t_m \nu \sigma a_x^\nu}{2 R p^\nu},$$

Откуда непосредственно для критического сближения получим:

$$a_x = R p \left(\frac{2 q_{ax}}{t_m \nu \sigma} \right)^{1/\nu} \quad (4)$$

Приравняв сближение контактирующих поверхностей для упругого (3) и хрупкого (4) контакта, получим:

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

Формула (5) позволяет рассчитать критическое номинальное давление в зависимости от физико-механических констант материалов и параметров профиля поверхностей трения.

Смена вида деформирования предполагает изменение фрикционных характеристик трибоконтакта. Оценку силы и коэффициента трения проведем на основе молекулярно-механической теории трения И.В. Крагельского [25], а также используя полученные выше соотношения. Представим силу трения $F_{тр}$ шероховатых поверхностей в виде:

$$F_{тр} = \tau_0 A_r + \beta N + K_x \int_0^{n_r} N_i \sqrt{\frac{a_i}{R}} dn_x, \quad (6)$$

где A_r – фактическая площадь контакта, τ_0 и β – сдвиговое сопротивление молекулярной связи при отсутствии нормальной нагрузки и коэффициент упрочнения молекулярной связи. Учитывая, что при фрикционном изнашивании хрупких и высокопрочных материалов пластическое деформирование не существенно, примем $K_x = 0,19\alpha_r$, $\alpha_r = 0,02$ – коэффициент гистерезисных потерь [26]. Представив, что $\int_0^{n_r} N_i \sqrt{\frac{a_i}{R}} dn_x = \frac{1}{0,75 I_e} \int_0^{n_r} a_i^2 dn_x$ для силы трения при упругом контакте получим:

$$F_{\text{тр}y} = \frac{\tau_0 t m A_a}{2} \left(\frac{a_y}{Rp} \right)^\nu + \beta N + 0,19 \alpha_r \frac{A_a t m a_y^{\nu+1}}{\pi R R p^\nu (\nu + 1) I_e}. \quad (7)$$

Для закритического давления в узле трибоузле при $q > q_{\text{ак}}$ силу трения найдем как:

$$F_{\text{тр}x} = \frac{\tau_0 t m A_a}{2} \left(\frac{a_x}{Rp} \right)^\nu + \beta N + 0,19 \alpha_r \frac{A_a t m \nu (\nu - 1) \sigma \pi^2 a_x^{\nu+0,5} K_3}{2 R^{0,5} R p^\nu}. \quad (8)$$

Для практических целей удобно получить расчетные соотношения для оценки коэффициентов трения в широком диапазоне нагрузок. Кроме того, формулы (7) и (8) являются функциями сближения, что затрудняет расчет. Используя определение $f_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{тр}}}{N}$, а также формулы (3) и (4) для коэффициентов трения получим:

$$f_y = \frac{\tau_0 \sqrt{tm} (\pi \delta I_e)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}}{2 \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} q_a^{\frac{1}{2\nu+1}}} + \beta + 0,19 \alpha_r \frac{tm \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} \delta^{\frac{\nu+1}{\nu+0,5}}}{0,75(\nu+1)} \left(\frac{q_a I_e}{\pi} \right)^{\frac{1}{2\nu+1}}, \quad (9)$$

$$f_x = \frac{\tau_0}{\nu \sigma} + \beta + 0,19 \alpha_r \frac{1,5 \sqrt{\Delta}}{\delta \nu} \left(\frac{2 q_a}{tm \sigma \nu} \right)^{\frac{1}{2\nu}}, \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{Rp}{R}, \delta = \frac{1,5}{\nu(\nu-1)K_3}.$$

Анализ результатов моделирования

Образцы композиционного материала были получены согласно технологии [8] из алюминиевой пудры и синтетических алмазов марки АС6 зернистостью 20/14, 14/10. Объемная плотность алмазов τ – 25% и 12,5%, что соответствует 100% и 50% концентрации алмаза К (за 100% концентрацию алмаза в материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 карата в 1 см³). Результаты сопоставлялись с образцами из сплава Д16, поверхность которых модифицировалась микродуговым оксидированием (МДО), до получения керамикоподобного покрытия.

Триботехнические испытания проводились на машине трения МТ-2 [5]. Реализуемая схема трения палец-кольцо, материалы контрообразцов: керамика ВаО-SiO₂-Al₂O₃. Испытания проводились в условиях сухого трения, и в присутствии воды. Линейная скорость скольжения 0,75 м/с.

Коэффициенты τ_0 и β определялись согласно методике и на оборудовании, предложенном в патенте [29]. Оценка параметров микрогеометрии поверхностей трения проводилась с использованием стандартных методов профилометрии ГОСТ 19300-86 [21], анализ микроструктуры – с помощью металлографического микроскопа. Микропрочность оценивали с помощью микротвердомера ПМТ-3, в качестве индентора использовалась пирамида Виккерса.

Типичный внешний вид образца их алмазосодержащего материала после испытаний представлен на рис.2. Трибоповерхность выглаживается до блеска, царапины и следы выкрашивания отсутствуют. На рис. 3 показана микроструктура поверхности образца до испытаний: темные зерна графитизированного алмаза распределены в объеме матрицы из оксидов алюминия.

Результаты испытаний (рис. 4, 5) подтверждают нелинейный характер изменения трибопараметров в зависимости от давления в зоне трения: не зависимо от условий трения можно выделить характерную точку перегиба, соответствующую изменению вида деформирования поверхностей трения. Критическое давление, полученное экспериментально и рассчитанное по формуле (5) приведено в табл. 1.



Рисунок 2 – Внешний вид образца алмазосо-держащего материала

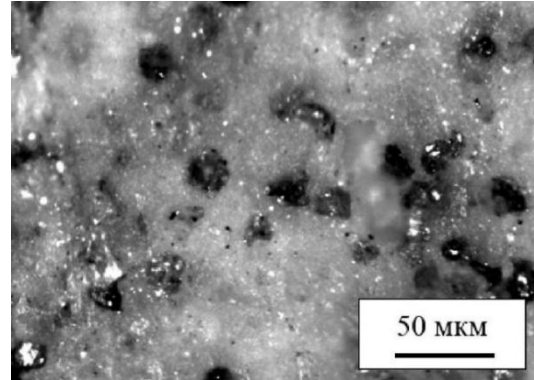
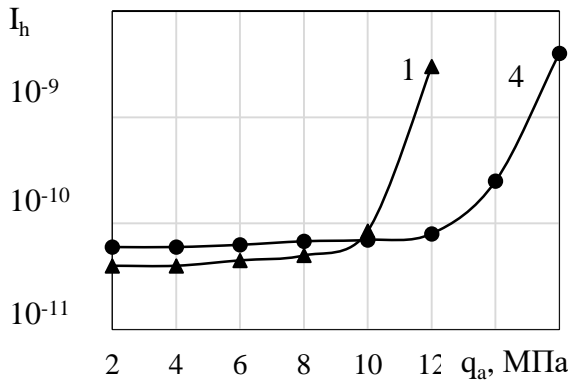
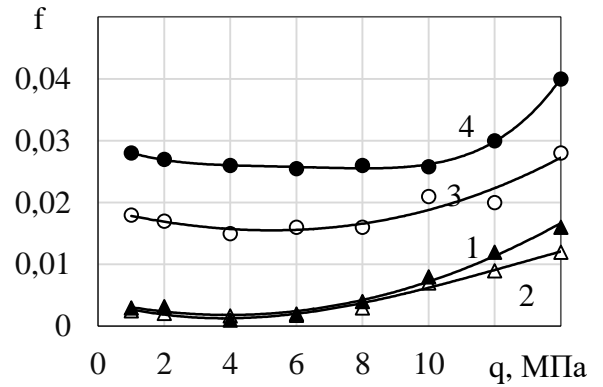


Рисунок 3 – Микроструктура поверхности алмазосо-держащего материала ($d = 20/14, K = 100 \%$)

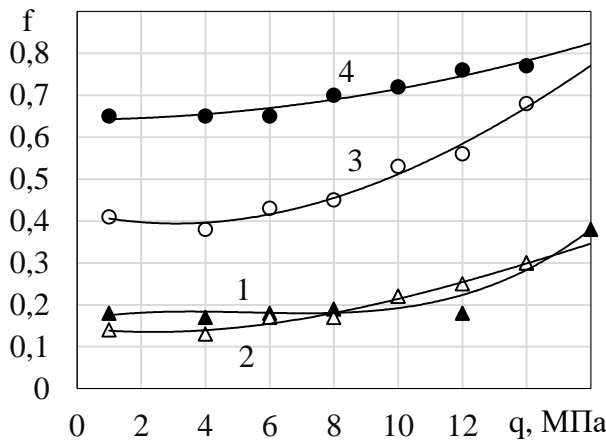


а)

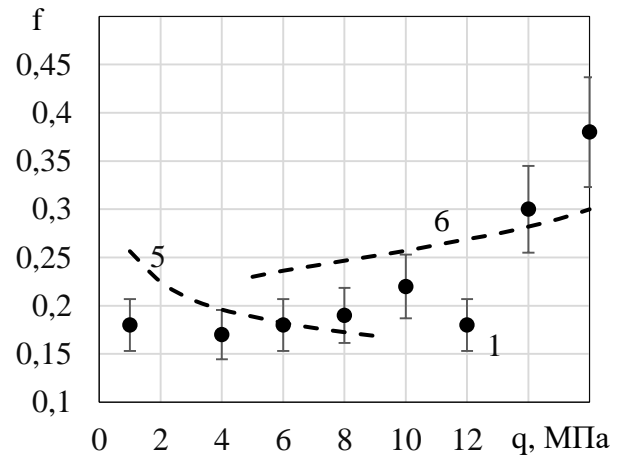


б)

Рисунок 4 – Оценка критического давления: по интенсивности изнашивания: а) по коэффициенту трения; б) в условиях граничного трения. 1 – АМК: $d=20/14, K = 100$; 2 – АМК: $d=14/10, K=100$; 3 – АМК: $d=20/14, K=50$; 4 – МДО Д16



а)



б)

Рисунок 5 – Оценка коэффициента сухого трения: а) результаты сопоставление результатов эксперимента и расчета по формулам (9) и (10). 1 – АМК: $d=20/14, K = 100$; 2 – АМК: $d=14/10, K=100$; 3 – АМК: $d=20/14, K=50$; 4 – МДО Д16; 5 – расчет по формуле (9); 6 – расчет по формуле (10)

Критические давления, рассчитанные по формуле (5) в пределах до 15% совпадают со значениями полученными экспериментально, но все же наблюдается тенденция занижения теоретических значений. Можно предположить, что при расчетных значениях q_{ax} процесс трещинообразования только начинает формироваться, однако значимым он становится при более высоких давлениях, при

$q_x = 1,1 \div 1,5 q_{ax}$. С увеличением зернистости алмаза увеличивается правый сомножитель в формуле (5), но снижается микропрочность, что нивелирует влияние изменение зернистости. Увеличение концентрации алмаза снижает микропрочность материала, что можно объяснить ростом концентраторов внутренних напряжений и снижением объёма связующего материала матрицы. Концентрация алмаза, входящая в оператор I_e существенно влияет на упругие свойства трибоконтакта в случае материала контрповерхности трения, близкого по механическим свойствам к материалу керамической матрицы и алмаза, как в нашем случае. Можно сказать, что увеличение концентрации алмаза снижает критическое давление.

По результатам эксперимента коэффициент трения пары материалов алмазосодержащая керамика-керамика в случае упругого деформирования слабо зависит от давления (рис.4). Анализ формулы (9) показывает, что влияние давления в первом и последнем слагаемом должны компенсировать друг друга, обычно так и бывает для металлов и полимеров. В нашем случае контактируют материалы с высокими модулями упругости и согласно теоретическим расчетам, влияние давления более существенно. Результаты эксперимента и расчет по формуле (9) показал, что коэффициент трения не значительно изменяется при уменьшении зернистости алмаза. Концентрация алмаза, влияет на коэффициент трения через оператор I_e . Так же с увеличением концентрации алмазов (особенно в условиях сухого трения) существенно изменяются коэффициенты τ_0 и β , что обусловлено увеличением свободного графита в зоне трения. В целом, с увеличением концентрации алмаза коэффициент трения снижается.

При давлении в контакте выше критического, коэффициент трения увеличивается с увеличением нагрузки (формула (10), рис. 4). Молекулярная составляющая коэффициента трения (формула 10) не зависит от давления, механическая составляющая возрастает в степени $\frac{1}{2\nu}$ где $\nu \approx 1,5 \div 3$. Следовательно шероховатость поверхности (и косвенно зернистость) влияет на скорость возрастания коэффициента трения. Зернистость алмаза и его концентрация влияют на коэффициент хрупкого трения опосредовано через микропрочность материала.

Таблица 1 – Триботехнические свойства испытываемых материалов

№	Материал пары трения	Микропрочность, σ , ГПа	Микротвердость, Н, ГПа	Критическое давление, МПа	
				Результаты эксперимента	Расчет по формуле (5)
1	АМК d=20/14, К = 100	1,78	6,71	6,4	5,71
2	АМК d=14/10, К=100	1,96	6,62	6,2	5,65
3	АМК d=20/14, К=50	2,25	5,83	7,5	6,47
4	МДО Д16	2,68	16,48	11,0	10,16

Характер кривых зависимости f от нагрузки для сухого и граничного трения очень близок, смещение по вертикальной оси можно объяснить изменением коэффициентов τ_0 , β и α_r в зависимости от вида смазки и контактного давления. Коэффициент трения для алмазосодержащей керамики с d=20/14, $\tau=10$, К = 100 при сухом трении и в воде отличаются в десятки раз. Учитывая, что теоретическая оценка результатов триботехнических испытаний очень чувствительна к условиям эксперимента, сложно ожидать высокой точности. Пример расчета по формулам (9)

и (10) приведен на рис. 5б. Расчетные кривые удовлетворительно описывают характер изменения коэффициента трения при увеличении контактного давления. Полученные теоретически и экспериментально, характер зависимостей коэффициента трения и величина критического давления коррелируют с данными полученными авторами [10] для газотермических покрытий, упрочненных синтетическими алмазами и электрокорундом.

Можно отметить хорошие антифрикционные свойства алмазосодержащего материала в сравнении с базовым керамическим покрытием без алмазов, полученным модифицированием алюминия микродуговым оксидированием. Коэффициент трения АМК ниже, чем для оксидированного покрытия в $1,4 \div 9,3$ раза при граничном трении и в $1,6 \div 4$ раза при сухом. Графит, образовавшийся при окислении алмазов, не удаляется из зоны трения, а заполняет поры керамической матрицы, уменьшая сопротивление сдвигу поверхностных слоев материала.

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено влияние нагрузки в зоне трибоконтакта на изменение вида контактного взаимодействия, характера износа и коэффициента трения антифрикционной алмазосодержащей минералокерамики. Показана правомерность классического подхода к описанию фрикционных свойств трибосопряжения алмазосодержащая минералокерамика – керамика в широком диапазоне давлений.

Подтверждено, что микропрочность может считаться критерием, определяющим изменение характера деформирования на пятне контакта для керамических композиционных материалов. Микропрочность снижается с увеличением зернистости и концентрации алмаза. Критическое давление зависит от параметров микрогеометрии, механических свойств материалов пары трения, зернистости и концентрации алмазов.

Теоретически и экспериментально установлено влияние микропараметров взаимодействующих полупространств на коэффициент трения в случае упругого деформирования и хрупкого разрушения. С увеличением давления в упругой области коэффициент трения уменьшается, в закритической – растет. Характер кривых зависимостей коэффициента трения от нагрузки для сухого и граничного трения близок, но различается на порядок.

Алмазосодержащий керамический материал имеет удовлетворительные антифрикционные свойства при отсутствии смазки. Коэффициент трения алмазосодержащего материала ниже, чем для оксидированного покрытия без алмазов в $1,6 \div 4$ раза при сухом трении. Структура керамической матрицы способствует удержанию алмазных зерен и распределению пленок твердосмазочного графита в зоне трения.

Полученные закономерности позволят оптимизировать состав алмазосодержащей минералокерамики и выбрать диапазон нагрузочных режимов эксплуатации трибоузлов из материалов данного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов, Ю. Н. Обобщенные факторы для характеристики изнашивания технической керамики / Ю. Н. Дроздов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. - 2004. - № 3. - С. 13-22.
2. Болотов, А. Н. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и

микродисперсным наполнителем / А. Н. Болотов, В. В. Новиков, О. О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. - 2018. - № 10. - С. 150-158.

3. Liu, B. Effects of Diamond on Microstructure, Fracture Toughness, and Tribological Properties of TiO₂-Diamond Composites / B. Liu, Z. Zhuge, S. Zhao et al. // *Nanomaterials*. - 2022. - V. 12. - Iss. 21. - P. 3733. <https://doi.org/10.3390/nano12213733>

4. Xia, Y. Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology / Y. Xia, Y. Lu, G. Yang et al. // *Materials*. - 2023. - V. 16. - Iss. 7. - P. 2710. <https://doi.org/10.3390/ma16072710>

5. Jin, L. Friction mechanism of DLC/MAO wear-resistant coatings with porous surface texture constructed in-situ by micro-arc oxidation / L. Jin, Y. Li, C. Liu et al. // *Surface and Coatings Technology*. - 2023. - V. 473. - P. 130010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130010>

6. Li, W. Undoped and diamond-doped MAO coatings prepared on Ti6Al4V: Microstructure, wear, corrosion, and biocompatibility properties / W. Li, J. Gao, Y. Ma et al. // *Surface and Coatings Technology*. - 2023. - V. 458. - P. 129340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129340>

7. Гусаков, Г. А. Исследование влияния термообработки на микротвердость и износостойкость покрытий из анодного оксида алюминия, модифицированных наноалмазами / Г. А. Гусаков, И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, Г. В. Шаронов // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. - 2019. - Т. 64. - № 2. - С. 157-165.

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

9. Болотов, А. Н. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов / А. Н. Болотов, В. В. Новиков, О. О. Новикова // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. - 2020. - № 4. - С. 30-37.

10. Кобяков, О. С. Исследование процессов формирования и триботехнических свойств износостойких композиционных газотермических покрытий, дисперсно-упрочненных синтетическими алмазами и электрокорундом / О. С. Кобяков, Н. В. Спиридонов // *Вестник Белорусского национального технического университета*. - 2011. - № 2. - С. 17-23.

11. Высотина, Е. А. Исследование структуры и функциональных характеристик алмазоподобных покрытий, полученных методом вакуумно-плазменного напыления / Е. А. Высотина, В. А. Казаков, М. Н. Полянский [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. - 2017. - № 12. - С. 12-17.

12. Дроздов, Ю. Н. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики / Ю. Н. Дроздов, В. А. Надеин, Т. М. Савинова // *Трение и износ*. - 2008. - Т. 29. - № 1. - С. 22-28.

13. Kim, J. H. A Fracture Mechanics Approach to Wear Mechanism of Ceramics Under Non-conformal Rolling Friction / J. H. Kim, S. G. Choi, S. S. Kim // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. - 2019. - 20(6). - P. 983-991.

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

15. Кузнецова, О. С. Кинетика изнашивания керамик / О. С. Кузнецова, Д. П. Данилович, С. С. Орданьян, Ю. А. Фадин // *Вопросы материаловедения*. - 2012. - № 4(72). - С. 370-375.

16. Морозов, Е. М. Контактные задачи механики разрушения / Е. М. Морозов, М. В. Зернин. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2017. - 544 с.

17. Айзикович, С.М. Механика контактных взаимодействий / С.М. Айзикович, В.М. Александров, И.И. Аргатов. - Москва: Физматлит, 2001. - 672 с.
18. Судник, Л.В. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты / Л.В. Судник, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко. – Минск: Беларуская навука, 2012. - 319 с.
19. Витязь, П. А. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь, В. И. Жорник, В. А. Кукареко [и др.]; Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт машиностроения. - Минск: Беларуская навука, 2011. - 526 с.
20. Fedorenko, D. O. Ceramic-matrix composite materials for the diamond abrasive tools manufacture / D. O. Fedorenko, V. A. Fedorovich, E. Yu. Fedorenko et al. // Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics. - 2017. - V. 117. - P. 212-224.
21. Чеповецкий, И. Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. Думка, - 1978. - 227 с.
22. Новикова, О. О. Моделирование износа пары трения "алмазосодержащая минералокерамика - керамика" / О. О. Новикова, А. Н. Болотов, В. В. Новиков // Вестник машиностроения. - 2024. - Т. 103, № 4. - С. 299-304.
23. Пушкарев, О. И. Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - Т. 83. - № 2. - С. 49-52.
24. Митлина, Л. А. Основные закономерности упругопластического и хрупкого разрушения эпитаксиальных феррошпинделей / Л. А. Митлина, М. Р. Виноградова, Т. В. Янковская // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. - 2004. - № 26. - С. 141-150.
25. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин. – М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
26. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др. - Москва: Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2003. - 575 с.
27. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.
28. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. / К. Джонсон. - М.Мир, 1989. - 510 с.
29. Патент № 2525585 С1 Российская Федерация, МПК G01N 19/02. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностного слоя электропроводящего материала / В. В. Измайлов, А. Ф. Гусев, Д. А. Гусев [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тверской государственный технический университет". № 2013116116/28; Заявл. 09.04.2013; Опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. - 8 с.

O.O. Novikova, V.V. Novikov, A.N. Bolotov
Tver State Technical University
Tver, Russia

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF ANTIFRICTION DIAMOND- CONTAINING MINERAL-CERAMICS

Abstract

The tribological properties of a composite material obtained from aluminum powder and microdispersed diamond by powder metallurgy followed by surface modification by microplasma electrolytic oxidation were studied theoretically and experimentally. A model

of contact interaction between diamond-containing mineral ceramics and ceramics in a wide range of loads is proposed. Relations were obtained for calculating the coefficient of friction and critical pressure corresponding to a change in the type of deformation of the composite material.

Keywords: diamond-containing mineral ceramics, antifriction properties, contact interaction model, microstrength, friction, wear.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-243

Д.Р. Сальников^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. danya2161@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ НА ФОРМУ ОТПЕЧАТКА ПОСЛЕ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Аннотация

В работе изучалось влияние остаточных напряжений на форму отпечатка после наноиндентирования. В качестве исследуемого материала использовались валы из стали 20X13, поверхность которых подверглась операции обкатки. Кроме того, применялся метод конечных элементов. Результаты исследований показали, что замер искажения отпечатка после наноиндентирования в напряжённом металле может выступать в качестве метода определения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, индентирование, отпечаток, метод конечных элементов

Введение

Остаточными напряжениями называют напряжения, возникшие и оставшиеся в материале в результате самых различных видов внешнего воздействия – термообработка, деформация, сварка, механическая обработка. Кроме того, остаточные напряжения могут появляться в металле в процессе его кристаллизации из жидкого состояния. Остаточные напряжения в материалах конструкций могут быть вредны и даже опасны при эксплуатации, поэтому так важна разработка новых и совершенствование старых методов фиксирования и определения характера данного вида напряжений в материалах. Одним из таких методов может стать уже известный и широко распространённый метод инструментального вдавливания или индентирования.

Тем не менее, для более глубокого исследования влияния остаточных напряжений на процесс вдавливания и его результаты обычного индентирования образцов с наведёнными остаточными напряжениями может быть недостаточно. Для решения данной задачи может пригодиться математическое моделирование и конкретно – метод конечных элементов.

Методы математического моделирования позволяют проводить эксперименты и исследования самых различных процессов, в том числе и металлургических, без больших финансовых затрат. Тем не менее, математическое моделирование может требовать большого количества вычислений и занимать