

IMPROVING THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF EPOXY COATINGS WITH THE INTRODUCTION OF GRAPHITE FILLER AND CURING IN A CONSTANT ELECTRIC FIELD

M.F. GALIKHANOV¹, Dr. Sc., E.N. MOCHALOVA^{1,2}, Cand. Sc.,
T.T. MUSAEV^{1,2}, Postgraduate

¹Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
20, N.E. Bauman St., 420111, Kazan, e-mail: mgalikhanov@yandex.ru

²Kazan National Research Technological University,
68, K. Marx St., 420015, Kazan, e-mail: enmochalova@mail.ru

The effect of the curing conditions of epoxy composites based on epoxy resin DER-331 and modified amine hardener L-20 and the introduction of a dispersed graphite filler on their mechanical and tribological properties is investigated. It has been experimentally shown that curing using an electric field leads to the orientation of polar groups and filler particles, which additionally increases hardness and reduces friction coefficients by 25%. Introduction of 4 wt. % graphite provides a significant reduction in the coefficient of friction and a slight hardening of the material, which improves its wear resistance. An integrated approach combining the choice of a matrix, the use of a filler and the application of a constant electric field during the curing process will increase the wear resistance of epoxy coatings, which will extend their service life and expand the scope of practical application.

Keywords: epoxy resin, modified amine hardener, graphite, polarization, coefficient of friction, strength, hardness.

Поступила в редакцию/received: 29.10.2025; после рецензирования/revised: 01.11.2025;
принята/accepted: 05.11.2025

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-34-46

АНАЛИЗ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

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

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: onvk@mail.ru

© Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н., 2026

В статье теоретически и экспериментально исследованы фрикционные свойства композиционного материала, представляющего собой керамическую матрицу из оксидов алюминия, легированную микродисперсными алмазами. Рассмотрены контактное взаимодействие и фрикционные характеристики данного материала в условиях упругого контакта микронеровностей в процессе установившегося режима изнашивания и при хрупком разрушении поверхностей в области высоких давлений. Результаты триботехнических испытаний подтвердили хорошие антифрикционные

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (29), 2026*

характеристики алмазосодержащего керамического материала в условиях сухого трения, что поясняется наличием в составе материала графита, играющего роль твердой смазки. Проведен подробный анализ влияния гранулометрических характеристик и концентрации алмазных зерен на микропрочность, критическое давление, коэффициент трения исследуемых поверхностей. Даны рекомендации по практическому применению деталей из алмазосодержащего керамического материала в трибоузлах наукоемкой техники.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алмазосодержащий керамический материал, твердосмазочный материал, антифрикционные свойства, микропрочность, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические элементы узлов трения все чаще используются в ответственных механизмах современной техники, что обусловлено их достаточно высокими противоизносными, прочностными, антикоррозионными, теплотехническими свойствами [1, 2]. Однако для ответственных трибоузлов, эксплуатируемых в условиях сухого трения, ограниченного количества смазочного материала, или при продолжительном отсутствии технического обслуживания необходимо применять материалы, обладающие также эффектом твердой смазки.

Наиболее часто в качестве материалов, характеризующихся низким сопротивлением сдвига, применяются полимерные материалы, графит или дисульфид молибдена. Их используют в качестве покрытия на поверхности трения готовой детали (как правило, смешивая с различного рода связующими, также обладающими антифрикционными свойствами) либо в качестве наполнителей керамической матрицы. В результате исследований нами был синтезирован композит, в котором в керамическую матрицу из оксидов алюминия включены зерна микродисперсного алмаза, частично графитизированного в процессе формирования материала. В данном композите прочностные, теплотехнические и прочие свойства керамической матрицы дополнены антифрикционными свойствами дисперсных алмазов [3, 4] и графитовых пленок. Согласно разработанной технологии, алмазосодержащий керамический материал (АКМ) синтезируется на поверхности композиционной детали алюминиево-алмазного состава методом микродугового оксидирования (МДО) [5, 6].

Проведенные предварительные исследования показали, что получен инновационный материал, который в зависимости от зернистости алмаза обладает как абразивными, так и антифрикционными свойствами [5]. При оценке фрикционных характеристик данного материала, легированного алмазами с зернистостью <20/14, получены неоднозначные результаты: при увеличении давления в зоне трения стабильно низкие значения износа резко увеличиваются. Можно предположить, что определенная нагрузка для данного материала является критической, при которой происходит изменение вида деформирования микронеровностей: усталостный износ при упругом контактировании сменяется хрупким разрушением, характерным для керамик [7–10].

Для керамических материалов одним из критериев критической нагрузки, соответствующей разрушению, выступает микропрочность. В связи с тем, что разработанный нами материал является композиционным, возникает вопрос о правомерности применения данного критерия. В исследовании О.И. Пушкарева [11] обоснована возможность использования понятия «микропрочность» для описания свойств материалов с дискретностью частиц в диапазоне 250...400 мкм.

Основные положения модели упругого контактного взаимодействия поверхностей материалов «алмазосодержащая керамика – керамика» рассмотрены нами в работе [10], но теоретические зависимости фрикционных характеристик данной пары материалов в условиях хрупкого разрушения исследованы недостаточно. Дополнительные экспериментальные исследования позволят определить область рациональных нагрузок для алмазных керамических узлов, эксплуатируемых в условиях дефицита или отсутствия жидких смазочных материалов. Анализ влияния составляющих АКМ (размера и дисперсности алмазов) позволит целенаправленно синтезировать детали трибоузлов с заданными свойствами и определить области оптимального применения разработанного материала.

Цель исследования состоит в экспериментальном анализе математической модели фрикционных свойств алмазосодержащей керамики и разработке на основе этого рекомендаций по получению и внедрению в промышленность инновационных материалов и покрытий, полученных по предложенной технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментов из алюминиевой пудры и синтетических алмазов марки АС-6 с различными гранулометрическими характеристиками методом порошковой металлургии были синтезированы заготовки испытуемых образцов [5]. Алюминиевая пудра и дисперсные алмазы были тщательно смешаны и помещены в пресс-форму. В образцах варьировались зернистость алмазов d и их концентрация K . Далее материал подвергался холодному брикетированию и последующему спеканию в муфельной печи при температуре 570...575 °С в условиях вакуума в течение 30...40 мин. Этот этап обеспечил формирование однородной структуры композита с оптимальными физико-механическими свойствами.

На втором этапе поверхность композиционного материала была модифицирована методом МДО. Процесс протекал при плотности тока 10 А/дм² в присутствии электролита, состоящего из гидроксида натрия (NaOH), концентрация 0,5...3 г/л, и жидкого стекла (Na₂SiO₃), концентрация 6 г/л. В результате этого процесса был сформирован упрочненный слой, включающий в себя оксиды алюминия α -, β - и γ -модификаций, в матрице которых равномерно распределены зерна частично графитизированного дисперсного алмаза. Для оценки достоверности результатов испытаний керамическое покрытие аналогичного состава, но без алмазов было сформировано на поверхности алюминиевого сплава Д16.

Триботехнические исследования проводились на машине трения МТ-2 по схеме трения «палец – кольцо», контробразец цилиндрической формы был изготовлен из электротехнической керамики BaO-SiO₂-Al₂O₃. Эксперименты осуществлялись в отсутствие смазочного материала и в присутствии воды как смазочной среды. Линейная скорость скольжения составляла 0,75 м/с.

Коэффициенты τ_0 и β определялись в соответствии с методикой, предложенной в патенте [12]. Оценка микрогеометрии фрикционных поверхностей проводилась с применением стандартных методов профилометрии, регламентированных ГОСТ 19300-86. Анализ микроструктуры осуществлялся с помощью металлографического микроскопа, а микропрочность оценивалась методом микротвердометрии на установке ПМТ-3 с использованием пирамиды Виккерса в качестве индентора.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА АНТИФРИКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

При построении модели использовано представление о молекулярно-механической теории трения [13, 14]. С учетом того, что взаимодействуют керамические материалы, принят линейно-упругий характер деформирования микронеровностей в установившемся режиме трения и преимущественно хрупкое разрушение материалов при превышении некоторого критического давления. Используются понятия «эквивалентная поверхность», «опорная кривая». Поверхность керамического алмазосодержащего материала моделируется в виде полупространства с распределенными сферическими сегментами одинакового радиуса R , которое представляет собой комбинацию из материала керамической связки и включенных в нее микродисперсных алмазов с объемной плотностью τ . С учетом значительной толщины упрочненного керамического слоя при построении модели использованы формулы, полученные Герцем [15], а также принято, что взаимное влияние микронеровностей незначительно [14].

Упругое сближение контактирующих поверхностей получено в виде

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

где q_a – номинальное давление в контакте; R_p , t_m , ν – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [14]; K_3 – коэффициент, характеризующий опорную кривую [14]; $I_e = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1 - \tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная; $I_a = \frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_k^2}{E_k}$, $I_c = \frac{1 - \mu_c^2}{E_c} + \frac{1 - \mu_k^2}{E_k}$ – упругие постоянные контактов 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 связки и контробразца.

Выразив нагрузку на единичную микронеровность при давлении на нее равном микропрочности согласно [15] и используя формулу (1), рассчитали величину критического номинального давления, при котором преимущественно упругое взаимодействие выступов сменяется хрупким разрушением:

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

где σ – микропрочности материала [11].

Для коэффициентов трения при упругом контакте f_y и хрупком взаимодействии f_x в области закритических давлений получено:

$$f_y = \frac{\tau_0 \sqrt{t_m} (\pi \delta I_e)^{\frac{2\nu}{2\nu + 1}}}{2\Delta^{\frac{\nu}{2\nu + 1}} q_a^{\frac{1}{2\nu + 1}}} + \beta + 0,19\alpha_z \frac{t_m \Delta^{\frac{\nu}{2\nu + 1}} \delta^{\frac{\nu + 1}{2\nu + 1}}}{0,75(\nu + 1)} \left(\frac{q_a I_e}{\pi} \right)^{\frac{1}{2\nu + 1}}, \quad (3)$$

$$f_x = \frac{\tau_0}{\nu \sigma} + \beta + 0,19\alpha_z \frac{1,5\sqrt{\Delta}}{\delta \nu} \left(\frac{2q_a}{t_m \sigma \nu} \right)^{\frac{1}{2\nu}}, \quad (4)$$

где $\Delta = \frac{R_p}{R}$, $\delta = \frac{1,5}{v(v-1)K_3}$; τ_0 и β – сдвиговое сопротивление молекулярной связи при отсутствии нормальной нагрузки и коэффициент упрочнения молекулярной связи. Коэффициент гистерезисных потерь α_2 принят равным 0,02 исходя из предположения, что при фрикционном изнашивании хрупких и высокопрочных материалов вклад пластических деформаций пренебрежимо мал [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные в результате испытаний интенсивность изнашивания и коэффициент трения в условиях граничного трения представлены на рис. 1. Интенсивность изнашивания остается постоянной и достаточно низкой при нагрузках до 8...10 МПа. При превышении некоторого значения q_a износ материалов резко увеличивается с увеличением нагрузки (рис. 1а). У керамического материала, имеющего алмазный наполнитель, интенсивность изнашивания ниже, чем у оксидного МДО-покрытия, сформированного на алюминиевом сплаве. Однако давление, соответствующее «катастрофическому износу» для алмазосодержащего материала, также ниже.

Коэффициент трения в присутствии смазки для исследуемых материалов аналогично интенсивности изнашивания незначительно меняется до некоторого критического давления, затем его величина существенно возрастает (рис. 1б). Зернистость алмаза d менее существенно влияет на коэффициент трения (рис. 1б, кривые 1, 2), чем его концентрация K (рис. 1б, кривые 1, 3). Коэффициент трения керамического покрытия, полученного только из оксидов алюминия, значительно выше (рис. 1б, кривые 1, 4), чем у исследуемого покрытия с антифрикционной добавкой из графитизированного алмаза. Полученные зависимости коэффициента трения в случае граничного трения для всех исследуемых материалов имеют экстремальный характер: коэффициент трения имеет минимальное значение при некотором давлении. Это согласуется с молекулярно-механической теорией трения для случая упругого контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

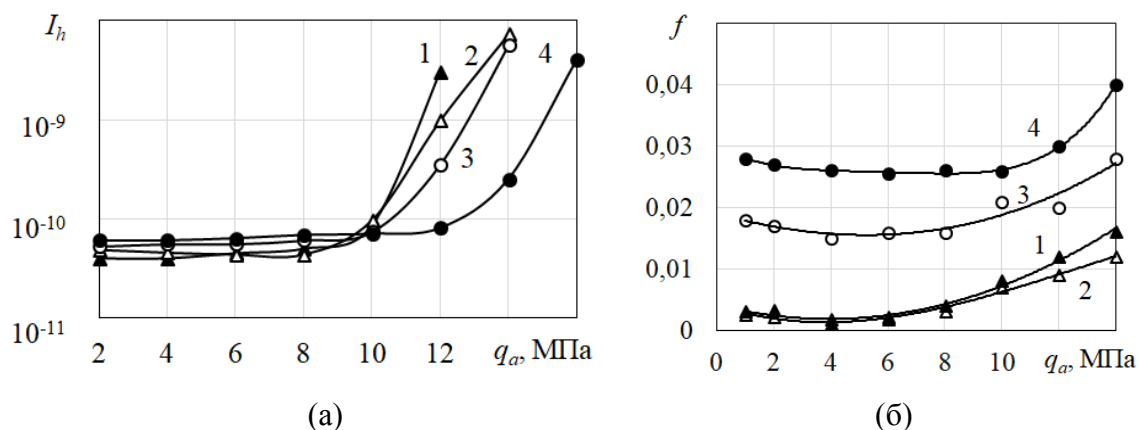


Рис. 1. Фрикционные характеристики керамических покрытий в присутствии смазки водой: интенсивность изнашивания (а); коэффициент трения (б); 1 – АМК: $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – АМК: $d = 14/10$, $K = 100$; 3 – АМК: $d = 20/14$, $K = 50$; 4 – МДО Д16

Критическое давление, полученное экспериментально и рассчитанное по формуле (2), приведено в табл. 1. Там же указаны измеренные экспериментально микротвердость и микропрочность исследуемых образцов.

Таблица 1. Триботехнические свойства испытываемых материалов

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

Применение алмазов более низких фракций ведет к возрастанию микропрочности образцов, снижению их микротвердости и критического давления. Уменьшение концентрации алмазных зерен вызывает увеличение микропрочности, критического давления и снижение микротвердости.

Качественно характер зависимостей коэффициента трения без смазочного материала и в присутствии воды близок: стабильные значения f после приработки сменяются значительным возрастанием при превышении некоторого давления (рис. 2). Коэффициент трения в отсутствие смазки при давлении до 8 МПа для аналогичных по составу материалов увеличивается в несколько десятков раз. Наиболее существенно изменяется f для АКМ с максимальным объемным содержанием алмазов (см. рис. 1б и рис. 2, кривые 1 и 2). Несмотря на рост коэффициента трения для данных материалов, он при этом все же сопоставим со значением f для твердосмазочных материалов на основе фторопласта [13].

Коэффициент трения для алмазосодержащих материалов с одинаковой концентрацией алмазов, но разной зернистостью имеет практически одинаковое значение и близкую нагрузочную зависимость (рис. 2, кривые 1, 2). Снижение концентрации алмазных зерен существенно увеличивает коэффициент трения аналогично условиям граничного трения (см. рис. 1б и рис. 2, кривые 3). Установлено, что рост f при сухом и граничном трении для аналогичных материалов в случае закритической нагрузки в отсутствие смазки значительно меньше. Для материала с составом $d = 20/14$, $K = 100$ (см. рис. 1б и рис. 2, кривые 1) увеличение коэффициента трения при нагрузке выше q_{ax} снижается примерно в 3,5 раза. Для покрытия, сформированного на основе из материала Д16, этот параметр ниже приблизительно в 1,7 раза. Экстремальный характер зависимости коэффициента сухого трения исследуемых материалов не выражен, минимальная величина f в установившемся режиме трения не выявлена.

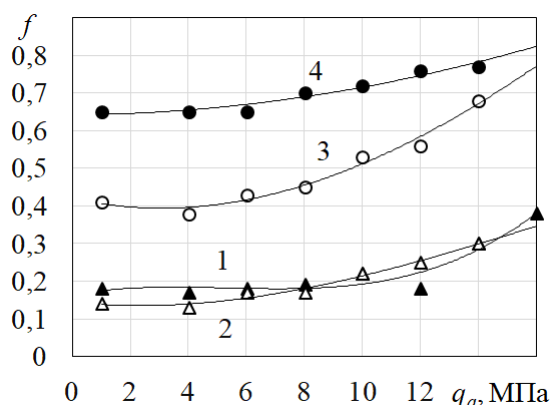


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента трения керамических покрытий в отсутствие жидкой смазки: 1 – АКМ: $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – АКМ: $d = 14/10$, $K = 100$; 3 – АКМ: $d = 20/14$, $K = 50$; 4 – МДО Д16

Результат сопоставления экспериментальных данных и расчета по формулам (3) и (4) приведен на рис. 3. Расчет приведен для условий сухого трения, так как согласно принятой методике фрикционные параметры τ_0 и β более корректно определялись именно в отсутствие смазки. В теоретической модели коэффициент трения при упругом взаимодействии выраженно уменьшается с ростом нагрузки, в зоне хрупкого разрушения влияние давления менее существенно. Можно сказать, что предложенные соотношения (3) и (4) удовлетворительно соответствуют результатам эксперимента.

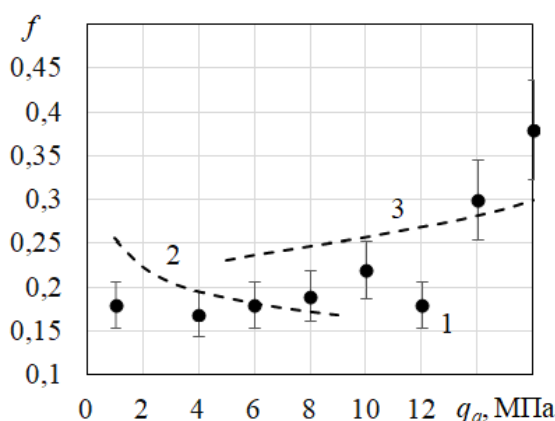


Рис. 3. Сопоставление экспериментального определения коэффициента трения и расчетной модели. 1 – АКМ: $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – расчет по формуле (3); 3 – расчет по формуле (4)

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Результаты испытаний подтвердили правильность предположения о линейно-упругом характере контакта композиционных материалов в установившемся режиме испытаний, а также о преимущественно хрупком разрушении взаимодействующих микронеровностей при превышении некоторой критической нагрузки.

2. Эффект твердой смазки, обусловленный наличием пленок графита, оказывает существенное влияние на снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения даже в присутствии водной смазочной среды. Особенно большое влияние

оказывает присутствующая в керамическом материале основа частично графитизированного алмаза на коэффициент граничного трения.

3. Теоретические значения критического давления, рассчитанные для нескольких различных по концентрации и зернистости алмазов образцов по формуле (2) с точностью до 15 %, соответствуют экспериментальным данным. На макроуровне процесс трещинообразования начинает сказываться при давлениях $q_a = 1,1 \dots 1,5 q_{ax}$.

4. При анализе влияния концентрации и зернистости алмаза на критическое давление необходимо оценить их воздействие на микропрочность. С увеличением объемной доли алмаза в композиционном материале уменьшается объем связующего материала матрицы, в ней возрастают внутренние напряжения, растет число концентраторов напряжений. Это приводит к снижению микропрочности. Можно сказать, что зернистость практически не влияет на q_{ax} . При увеличении зернистости алмаза увеличивается правый сомножитель в формуле (2), но микропрочность при этом снижается. Повышение концентрации алмазов приводит к снижению q_{ax} , так как уменьшается микропрочность композиционного материала.

5. Коэффициент трения при упругой деформации микронеровностей согласно результатам эксперимента и анализу формулы (3) мало зависит от размера алмазного зерна, но снижается с увеличением концентрации алмазов. Это вызвано возрастанием твердости поверхности композиционного материала и ростом графитовых твердосмазочных пленок. В условиях хрупкого разрушения размер алмазных зерен и их количество влияют на коэффициент трения через микропрочность материала (формула (4)). Так же зернистость (косвенно шероховатость) влияет на изменение коэффициента трения через показатель степени $\frac{1}{2\nu}$. Здесь ν изменяется в достаточно широких пределах (1,5...3) и определяется шероховатостью взаимодействующих поверхностей, способом предварительной обработки поверхности и размером алмазного зерна.

6. Согласно аналитической модели, давление в контакте по-разному влияет на коэффициенты трения при увеличении нагрузки. В зоне упругой деформации с увеличением нагрузки f_y снижается. В экспериментальных данных снижение выражено более слабо. При закритических давлениях (формула (4)) коэффициент трения возрастает с увеличением нагрузки, что вызвано ростом механической составляющей f_x . Результаты эксперимента подтверждают этот вывод.

7. На величину коэффициента трения во всем диапазоне нагрузок существенно влияют коэффициенты τ_0 , β и α_2 . Их значение во многом определяется наличием свободного графита в зоне трибоконтакта. Количество графита, образующегося в процессе оксидирования алмазно-керамической матрицы, коррелирует с объемом алмазных зерен в материале и возрастает при увеличении концентрации и зернистости алмазов. Можно отметить, что характер зависимостей коэффициента сухого и граничного трения во всем диапазоне нагрузок близок и имеет некоторое смещение по вертикальной оси. Очевидно, что на коэффициенты τ_0 , β и α_2 влияет вид смазки. В дальнейших исследованиях необходимо уделить большее внимание изучению данных параметров применительно к различным условиям трения АКМ.

8. Алмазосодержащий керамический материал показал значительно более высокие антифрикционные характеристики по сравнению с базовым МДО-покрытием, сформированным на сплаве Д16. Благодаря твердосмазочным свойствам графитовых пленок коэффициент трения в установившемся режиме для них ниже в 1,6...14,4 раза при трении со смазочным материалом и в 1,6...4,5 раза при работе без смазки. Во

многим за счет графитовой пленки наблюдается выглаженная до зеркального блеска поверхность образцов из АКМ после испытаний.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

Практический интерес представляет применение результатов данного исследования в направлении создания и внедрения в промышленность инновационных материалов, изготовленных согласно предложенной технологии.

С ростом значимости глобальных проблем энергосбережения и защиты окружающей среды важно стремиться к снижению материалоемкости узлов трения при сохранении и повышении их износостойкости. Например в аэрокосмической, судостроительной промышленности важно максимальное снижение общей массы разрабатываемой конструкции за счет отдельных элементов. Антифрикционное алмазосодержащее покрытие на керамическом основании обеспечивает в условиях низких температур и вакуума длительное безаварийное функционирование узла.

Перспективно применение алмазосодержащих керамических покрытий, сформированных методом микроплазменного электролитического оксидирования вместо тяжелых металлических сплавов. В машиностроении трибоузлы из АКМ можно использовать для замены традиционных стальных деталей. При этом прогнозируется значительное увеличение износостойкости и материалоемкости [1, 3].

Известно традиционное применение в узлах трения деталей из вентильных металлов (алюминия, титана), упрочненных методом МДО (это подшипники скольжения, поршни, цилиндры, торцевые уплотнения и др.). Оксидное покрытие, несомненно, повышает износостойкость деталей, однако для некоторых критически важных отраслей, таких, например, как авиация, данного метода инженерии поверхности недостаточно для обеспечения заданного комплекса фрикционных характеристик [3]. В этом случае решением является использование деталей из алмазосодержащих композиционных материалов, модифицированных МДО до керамикоподобного алмазного антифрикционного покрытия. Применяемые в традиционном машиностроении детали пар трения, упрочненные электролитическим оксидированием и эксплуатируемые в условиях недостатка смазочного материала или сухого трения, могут быть заменены деталями из алмазосодержащих материалов с перспективой значительного снижения коэффициента трения.

Имеются данные о положительных результатах применения дисперсных алмазов в качестве твердой смазки для искусственных имплантатов [16]. Известно, что срок службы металлических имплантатов для тазобедренных и коленных суставов весьма ограничен вследствие износа и коррозии. Все компоненты АКМ нетоксичны и биосовместимы с человеческим организмом. Возможно, по результатам дополнительных исследований будет доказана применимость разработанного материала для решения этой проблемы.

Еще одним перспективным направлением использования деталей из АКМ является изготовление элементов колясок, костылей, тростей, протезов для людей с ограниченными возможностями здоровья. Традиционно применяемые детали из алюминиевых сплавов имеют низкую устойчивость к механическим повреждениям, слабую адгезию с лакокрасочными материалами, плохое сцепление с кожей ладоней и недостаточно инертны к ней. Детали из титановых сплавов, помимо их высокой стоимости, способны вызывать аллергические реакции. Элементы конструкций из

алмазосодержащей керамики повысят коррозионностойкость и биосовместимость деталей медицинских изделий, подвергающихся фрикционному воздействию.

Хорошие результаты показывает МДО-покрытие алюминиевых деталей для защиты от воздействия химически активных растворов, морской воды, экстремальных атмосферных воздействий и других агрессивных сред [17]. В случае если триботехнические характеристики поверхностей трения недостаточны, можно заменить материал деталей трибоузлов на антифрикционный АКМ.

Трибоповерхности узлов трения, изготовленные из АКМ и упрочненные микроплазменным электролитическим оксидированием, показывают весьма хорошие результаты в трибоузлах, смазываемых современными магнитными материалами [18]. Известно, что магнитные смазочные среды оказывают коррозионное воздействие на контактирующие поверхности, агломераты из магнитных частиц также абразивно изнашивают поверхности (микротвердость частиц магнетита около 5 ГПа) [19].

Нами получен положительный пример применения пары трения АКМ – керамика в качестве рабочего узла коллоидной мельницы (диспергатора). Сменные втулки из АКМ обеспечивали необходимую дисперсность измельчаемого материала – кристаллического бета-каротина, который, как ненасыщенный углеводород, характеризуется низкой устойчивостью к воздействию света, кислорода, высоких температур, pH среды, наличию ионов металлов. Таким образом, разработанный материал можно рекомендовать к использованию для изготовления фрикционных узлов современного оборудования фармацевтической, пищевой и химической отраслей.

Предложенная модель позволяет синтезировать АКМ с заданными триботехническими свойствами. На этапе проектирования можно варьировать зернистость (шероховатость) и концентрацию частиц алмазов для получения требуемого коэффициента трения при необходимой контактной нагрузке трибоузла.

По результатам моделирования можно будет предварительно, до проведения дорогостоящих натурных испытаний, оценить область устойчивой работы трибоузлов по величине контактного давления.

Модель может применяться для оценки фрикционных характеристик не только АКМ, но и других упругих двухкомпонентных композиционных материалов, а также композиционных материалов, полученных по иной технологии. Анализ физико-механических свойств материалов, входящих в соотношения (2)...(4), фрикционных параметров τ_0 , β и α_2 позволит целенаправленно подбирать структурные составляющие для создания новых композиционных материалов с заданными свойствами.

В предыдущих исследованиях авторы показали, что по аналогичной технологии можно получать не только антифрикционные, но и абразивные АКМ. Метод решения, основанный на молекулярной механической теории изнашивания, успешно применен в работе [10] для оценки работоспособности абразивного алмазосодержащего керамического материала. Этот факт подтверждает правомерность предлагаемого подхода, а также, по нашему предположению, означает, что полученный в настоящем исследовании результат можно применять для определения коэффициента трения абразивных материалов, которые очень широко востребованы в обрабатывающей промышленности. Данное предположение планируется проверить в предстоящих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований подтвердили фрикционную модель работоспособности АКМ. Проанализировано влияние нагрузки на изменение вида контактного взаимодействия: переход от упругого взаимодействия в установив-

шемся режиме к хрупкому разрушению микронеровностей в диапазоне интенсивных нагрузок. Подтверждена правомерность введения критерия микропрочности для расчета критического давления, соответствующего изменению вида контактного взаимодействия и вида износа.

Проведен подробный анализ влияния зернистости и концентрации алмазных зерен на микропрочность, критическое давление, коэффициент трения исследуемых поверхностей при упругом и хрупком деформировании. Полученные результаты помогут выбрать технологию получения и состав АКМ, который будет соответствовать условиям эксплуатации реального узла трения.

Показана важность дополнительного изучения трибологических параметров τ_0 , β и α_2 для описания износа трибоузла в условиях сухого и граничного трения. Установлено, что характер нагрузочных зависимостей коэффициента трения АКМ без смазочного материала и в присутствии воды совпадает, но отличается на порядок.

Результаты триботехнических испытаний АКМ подтвердили его достаточно хорошие антифрикционные характеристики в отсутствие смазки. Алмаз и графит, присутствующие в зоне трибоконтакта, снижают коэффициент трения в 1,6...4,5 раза по сравнению с МДО-покрытием на сплаве Д16 при сухом трении.

По результатам проведенных испытаний определена предполагаемая область применения деталей узлов трения из АКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н. Обобщенные факторы для характеристики изнашивания технической керамики // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2004. № 3. С. 13–22.
2. 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.
3. Jin L., Li Y., Liu C., Fan X., Zhu M. Friction Mechanism of DLC/MAO Wear-resistant Coatings with Porous Surface Texture Constructed in-situ by Micro-arc Oxidation // *Surface and Coatings Technology*. 2023. V. 473. Art. № 130010.
4. Гусаков Г.А., Гасенкова И.В., Мухуров Н.И., Шаронов Г.В. Исследование влияния термообработки на микротвердость и износостойкость покрытий из анодного оксида алюминия, модифицированных наноалмазами // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2019. Т. 64. № 2. С. 157–165.
5. 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.
6. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.
7. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Савинова Т.М. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 1. С. 22–28.
8. Kim J.H., Choi S.G., Kim S.S. A Fracture Mechanics Approach to Wear Mechanism of Ceramics Under Non-conformal Rolling Friction // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. V. 20(6). P. 983–991.

9. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
10. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Обработка технической керамики абразивным алмазным инструментом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 13–21.
11. Пушкарёв О.И., Кулик О.Г., Никуйко Л.А. Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 49–52.
12. Патент РФ 2525585. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностного слоя электропроводящего материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, Д.А. Гусев, И.Н. Нестерова, М.В. Новоселова. Заявл. 09.04.2013. Опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23.
13. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) М.: Машиностроение, 2003. 575 с.
14. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
15. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
16. Gopal V., Chandran M., Rao M.S.R., Mischler S., Cao S., Manivasagam G. Tribocorrosion and Electrochemical Behaviour of Nanocrystalline Diamond Coated Ti Based Alloys for Orthopaedic Application // *Tribology International*. 2017. V. 106. P. 88–100.
17. Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V. Formation of Wear-and Corrosion-resistant Ceramic Coatings by Combined Technologies of Spraying and Micro-arc Oxidation // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. V. 92. № 7. P. 875–882.
18. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
19. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние магнитного поля на поверхностные эффекты при смазке магнитной жидкостью // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 2 (2). С. 14–22.

Для цитирования: Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н. Анализ фрикционных свойств алмазосодержащей керамики и определение ее области применения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 34–46.

ANALYSIS OF THE FRICTION PROPERTIES OF DIAMOND-CONTAINING CERAMICS AND DETERMINATION OF THEIR APPLICATIONS

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

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: onvk@mail.ru

The paper theoretically and experimentally studies the frictional properties of a composite material, which is a ceramic matrix of aluminum oxides, doped with micro-dispersed diamonds. The contact interaction and frictional characteristics of this material

are considered under conditions of elastic contact of micro-irregularities in the process of steady-state wear and brittle fracture of surfaces in the high-pressure area. The results of tribotechnical tests confirmed the good antifrictional characteristics of the diamond-containing ceramic material under dry friction conditions, which is explained by the presence of graphite in the material, which acts as a solid lubricant. A detailed analysis of the influence of granulometric characteristics and diamond grain concentration on the microstrength, critical pressure, and friction coefficient of the studied surfaces was conducted. Recommendations are given on the practical application of parts made of diamond-containing ceramic material in tribo units of science-intensive equipment.

Keywords: microarc oxidation, diamond-containing ceramic material, solid lubricant material, antifriction properties, microstrength, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 07.11.2025; после рецензирования/revised: 12.11.2025;
принята/accepted: 17.11.2025

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-46-53

О РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измаилов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В., 2026

На примере контакта твердых тел с первоначальным касанием в точке (контакт шар – плоскость) проанализировано соответствие известных в трибологии линейных зависимостей, описывающих фрикционное взаимодействие технических поверхностей: удельной силы трения от фактического контактного давления и силы трения от внешней нормальной нагрузки. Отмечена необходимость учета адгезионного взаимодействия контактирующих тел, которое может быть сравнимо с величиной внешней нормальной силы, действующей на контактное соединение. Показано, что линейной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления непосредственно соответствует нелинейная зависимость силы трения от внешней нормальной нагрузки. Тем не менее, в некотором диапазоне изменения последней эта зависимость хорошо аппроксимируется линейным уравнением, известным как двучленный закон трения Кулона. Приведено сравнение результатов экспериментального измерения сил трения с их расчетными значениями, которое показало их хорошее соответствие для испытанных металлических пар трения.

Ключевые слова: сила трения, удельная сила трения, закон трения Кулона, контактная адгезия.