

load; it is constant for a given friction pair under the given operating conditions. A close correlation was found between the corresponding frictional interaction parameters at the stress and force levels.

Keywords: ceramic materials, friction, friction coefficient, specific friction force, temperature.

Поступила в редакцию/received: 18.12.2025; после рецензирования/reviced: 12.01.2026;
принята/accepted: 16.01.2026

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-59-69

ПРИМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Показана правомерность применения классического подхода к решению контактных задач для двухкомпонентных композиционных поверхностей, основанного на контроле микрогеометрии профиля поверхностей. В качестве композиционной поверхности рассмотрено однородное полупространство из материала матрицы с расположенными в нем с заданной объемной плотностью сферическими сегментами одинакового радиуса, моделирующими включения из материала наполнителя глобулярной формы. Профиль композиционного полупространства представляет собой эквивалентную поверхность со степенным распределением вершин микронеровностей, аналогичным опорной кривой распределения материала реальной детали. Проверена инженерная модель оценки фрикционных характеристик трибоузла с композиционными материалами применительно к контакту алмазосодержащего керамического материала и керамического однородного полупространства. Данная модель может быть использована для определения фрикционных характеристик композиционных материалов с наполнителями глобулярной формы.

Ключевые слова: микрогеометрия поверхности, контактная задача, фрикционные характеристики, композиционные материалы, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства узлов трения во многом определяются контактным взаимодействием деталей, входящих в их конструкцию. Физико-механические свойства поверхностных слоев трущихся деталей, их геометрия на микро- и наноуровне напрямую определяют фрикционные свойства, контактную жесткость и герметичность трибоузла. В российской и мировой научной и инженерной среде признана модель описания геометрических характеристик поверхности, предложенная профессором Н.Б. Демкиным [1, 2]. Основные положения разработанной им методики определения микрогеометрии поверхности закреплены в нормативных документах Российской

Федерации [3–5]. Этот подход позволил рассчитать такие важные характеристики контакта шероховатых тел, как реальное контактное давление и реальная площадь контакта.

Задача контакта шероховатых поверхностей, учитывающая модель поверхности и метод решения, представляет интерес и в настоящее время. В работе [2] предложен подход, основанный на методе усреднения, для решения дискретных контактных задач для тел с заданной макро- и микрогеометрией. Проанализировано влияние параметров микрогеометрии на реальные и номинальные характеристики контакта. Значение работ Н.Б. Демкина по анализу микрорельефа контактной поверхности, методов обработки профилограмм отмечено в исследовании [6], где на основе использования параметров микрогеометрии контактирующих поверхностей рассматривается методика численного моделирования характеристик контактных пар в технических системах. Показаны перспективы создания трехмерной модели шероховатой поверхности, наиболее приближенной к реальной, как основы при выполнении расчетов характеристик контакта.

В современных исследованиях по контактному взаимодействию шероховатых тел, несмотря на многообразие подходов, изучаются однородные (гомогенные) материалы и полупространства. Однако инновационные наукоемкие материалы часто представляют собой матричную структуру, при которой в основной материал-связку включены наполнители или легирующие элементы. Включения отличаются по физико-механическим свойствам от основного материала и имеют четко очерченные границы.

В настоящее время наиболее распространены исследования контактных задач фрикционных композиционных материалов с полимерными матрицами или полимерными наполнителями, что обусловлено доказанными антифрикционными свойствами материалов такого типа. В работе [7] при анализе триботехнических характеристик однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры использован подход механики композиционных материалов. В основе решения контактной задачи «сталь – композит» лежит метод локального приближения, учитывающий влияние компонентов структуры, применен прикладной пакет ANSYS Mechanical. Задача решена из условия, что в зоне взаимодействия контакт идеальный. Авторами работ [8, 9] использован метод конечно-элементного анализа. Взаимодействие стального контртела по полимерному композитному образцу в условиях сухого трения скольжения рассмотрено с учетом микроструктуры, шероховатости контртела и фрикционного нагрева материалов пары трения. В исследовании [10] проанализировано поведение полимерных композитных материалов, армированных хаотично ориентированными короткими натуральными волокнами, подверженных внешним напряжениям в условиях квазистатического контакта и сухого трения. Контактная задача предполагает, что композиционный материал в виде двумерной плоской пластины находится во фрикционном контакте с жестким основанием. Предложено решение методом конечных элементов в пространстве и аппроксимация методом конечных разностей во времени. Можно сделать вывод о том, что в большинстве исследований не учитывают шероховатость контактирующих поверхностей, а предполагают их абсолютно гладкими. Контактная задача решена конечно-элементным методом.

Значительно меньшее количество работ посвящено решениям контактных задач композиционных материалов с относительно твердыми матрицами и включениями. К такому типу материалов относятся, например, алмазосодержащие композиционные материалы. При использовании алмазов крупных фракций получают инструментальные материалы для абразивной обработки. Данные материалы широко распространены, но традиционная связка обычно полимерная, пластичная из мягкого

металла или керамическая из легкоплавкого стекла. Инженерные модели, описывающие фрикционные свойства таких материалов, часто носят феноменологический характер и не включают примеры решения контактных задач [11, 12].

Микро- и нанодисперсный алмаз, вводимый в качестве наполнителя, обладает высокой твердостью, прочностью и одновременно низким трением, что позволяет получать инновационные трибоматериалы [13–16]. В современных исследованиях значительное внимание уделяется физико-химическим аспектам получения данных материалов, их физико-механическим свойствам и практическому применению в узкоспециализированных узлах трения. Решение контактных задач с учетом микрогеометрии взаимодействующих поверхностей не рассматривается. Л.В. Судник, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко исследуют получение и применение алмазосодержащих абразивных нанокomпозиционных материалов со стеклокерамической матрицей. Ими исследуется связь между структурой рабочего слоя, внутренней структурой и эксплуатационными параметрами [16], напряженно-деформированное состояние поверхности алмазосодержащих композиционных материалов анализируется методами конечных элементов и математической статистики. Проводится анализ микрогеометрии (морфологии) поверхности композиционного материала (инструмента) и контртела (обрабатываемой детали). Однако зависимость характеристики износа контртела, выраженная как производительность шлифования, построена на обработке экспериментальных данных, без учета результатов решения контактной задачи и параметров профиля поверхностей. В работе сделан вывод о возможности упругого, пластического и упругопластического контакта алмазного инструмента на стеклокерамической матрице с металлической деталью, в зависимости от вида обработки.

По результатам анализа исследований можно констатировать отсутствие в научной литературе простых инженерных моделей для описания свойств фрикционного контакта для двухкомпонентных систем. Представляется интересным рассмотреть трибозаимодействие композиционных материалов с точки зрения классического подхода. Целью исследования является проверка инженерной модели фрикционных характеристик контакта композиционных двухкомпонентных материалов, основанной на классическом подходе контроля и описания микрогеометрии профиля поверхности.

СТРУКТУРА ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА, ВЫБОР МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим композиционный материал, представляющий собой двухслойную структуру с подложкой из основного гомогенного материала – вентильного металла и композиционного верхнего слоя из керамической матрицы с включениями микродисперсных алмазов [17–19]. Данную систему, в которой все материалы отличаются по физико-механическим свойствам, будем называть «алмазосодержащий композиционный материал» (АКМ). Толщина керамического слоя значительна (до 1,3 мм), что позволяет пренебречь влиянием основания при решении контактной задачи и считать поверхность АКМ полупространством из композиционного материала.

Матрица АКМ состоит в основном из оксидов алюминия Al_2O_3 преимущественно α -модификаций и незначительного процента β - и γ -модификаций. В матрицу (связку) включены зерна алмаза зернистостью (диаметром) d от 14/10 до 125/100 мкм. По границам алмазов присутствует графит, образовавшийся под воздействием высокой температуры при спекании алмазно-алюминиевой заготовки и последующем микроплазменном модифицировании поверхности (рис. 1). Концентрацию алмаза в алмазоносном слое можно описать двумя характеристиками: объемной

плотностью τ и технологической концентрацией алмаза K , принятой при производстве и использовании абразивного алмазного инструмента. Объемная плотность τ рассчитывается как отношение объема алмазных зерен к общему объему алмазосодержащего слоя. При определении K за 100%-ю концентрацию алмаза в алмазосодержащем материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 карата в 1 см^3 . Внешний вид поверхности композиционного материала приведен на рис. 2. Более светлые участки – материал керамической связки. Частично графитизированные алмазы – это темные зерна, частично утопленные в матрицу. Виден блеск алмазов, не покрытых слоем графита.

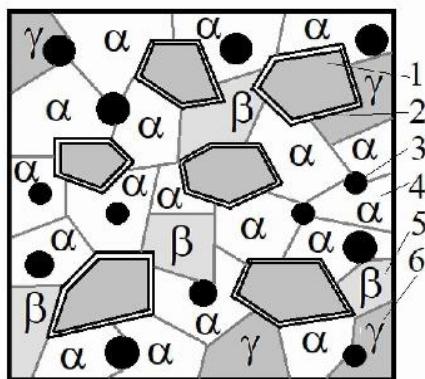


Рис. 1. Принципиальная модель структуры АКМ: 1 – дисперсный алмаз; 2 – графит; 3 – поры; 4 – α -модификация Al_2O_3 ; 5 и 6 – β - и γ -модификации Al_2O_3

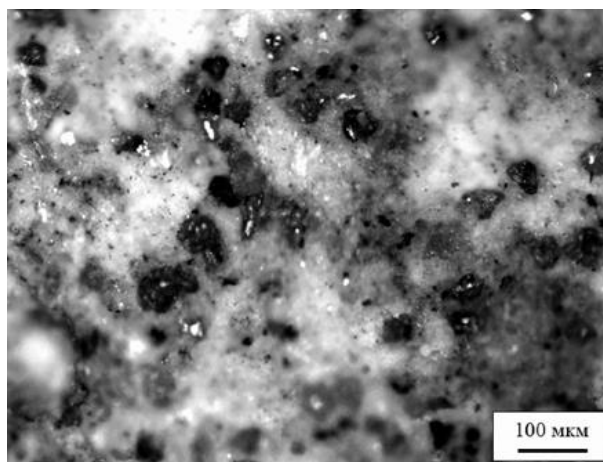


Рис. 2. Поверхность АКМ: $d = 80/63$, $K = 75 \%$

Сопоставить размер дисперсных алмазов и микронеровностей поверхности матрицы можно на рис. 3. Для поверхности трения АКМ ($d = 80/63$, $K = 50 \%$, рис. 3) после приработки высота сглаживания $R_p = 5,3 \text{ мкм}$, что в 12–16 раз меньше диаметра алмаза. Средний шаг неровностей профиля $S_m = 136 \text{ мкм}$ в 1,5–1,8 раза больше линейного размера алмаза. Можно предположить, что даже значительно выступающие над рабочей поверхностью алмазы после приработки частично скалываются и их вылет не превышает половины зернистости, что составляет не более значения R_p для всей поверхности.



Рис. 3. Профилограмма поверхности трения АКМ после приработки:
 $d = 80/63; K = 50 \%$

В процессе проведенных предварительных испытаний контролировались макроотклонения поверхностей образцов АКМ. Конусность, бочкообразность и другие дефекты не зафиксированы.

Выберем в качестве модели поверхности АКМ полупространство с расположенными на нем сферическими сегментами одинакового радиуса R . Для оценки теоретической модели контакта композиционного материала и контртела применим понятие объемной плотности распределения алмаза τ в АКМ. Будем использовать эквивалентную поверхность со степенным распределением вершин микронеровностей, аналогичным опорной кривой распределения материала реальной детали (рис. 4).

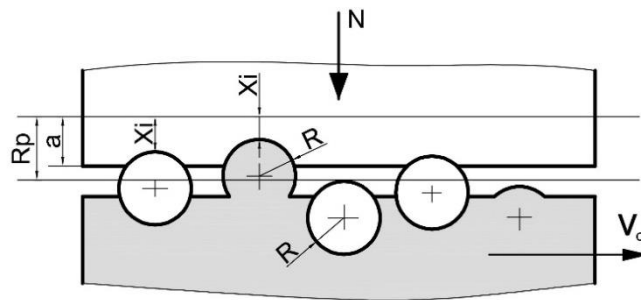


Рис. 4. Модель для задачи контактного взаимодействия однородного полупространства с полупространством из композиционного материала

При описании характеристик контакта примем, что толщина покрытия значительно больше величины внедрения отдельных микронеровностей. Влиянием основного материала детали можно пренебречь и считать, что исследуемая поверхность состоит только из материала АКМ. Это дает возможность воспользоваться формулами Герца при описании характеристик контакта единичной микронеровности [20]. Предположим, что взаимным влиянием микронеровностей можно пренебречь вследствие малой плотности контакта [21].

При оценке трибопараметров сопряжения «гладкое керамическое полупространство контртела – шероховатая поверхность композиционного образца» будем полагаться на молекулярно-механическую теорию трения [21, 22]. В модели учтены предложенные Н.Б. Демкиным понятия фактической и контурной площади контакта, фактического давления и пр. При расчетах исходили из того, что характер контакта микронеровностей после приработки линейно-упругий. Критерием для оценки нагрузки, определяющей смену характера взаимодействия микронеровностей, выбрана микропрочность АКМ σ . Будем считать, что при превышении давления на пятне контакта значения σ на микронеровностях преобладает хрупкое разрушение материала.

ПРОВЕРКА ВЫБОРА МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Инженерная модель фрикционных параметров. Получены уравнения позволяющие рассчитать коэффициент трения композиционного материала при упругом f_y и хрупком f_x контакте:

$$f_y = \frac{\tau_0 \sqrt{tm} (\pi \delta I_e)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}}{2 \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} q_a^{\frac{1}{2\nu+1}}} + \beta + 0,19 \alpha_2 \frac{tm \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} \delta^{\frac{\nu+1}{\nu+0,5}}}{0,75(\nu+1)} \left(\frac{q_a I_e}{\pi} \right)^{\frac{1}{2\nu+1}}, \quad (1)$$

$$f_x = \frac{\tau_0}{\nu \sigma} + \beta + 0,19 \alpha_2 \frac{1,5 \sqrt{\Delta}}{\delta \nu} \left(\frac{2 q_a}{tm \sigma \nu} \right)^{\frac{1}{2\nu}}, \quad (2)$$

где q_a – номинальное давление в контакте; ν , tm , – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [1, 3–5]; $I_e = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная (I_a , I_c – упругие постоянные контактов алмаз – материал контрообразца, материал матрицы – материал контрообразца); $\Delta = \frac{Rp}{R}$, $\delta = \frac{1,5}{\nu(\nu-1)K_3}$ (Rp , K_3 – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей); τ_0 и β – сдвиговое сопротивление молекулярной связи при отсутствии нормальной нагрузки и коэффициент упрочнения молекулярной связи. Принято $\alpha_2 = 0,02$ [21].

Величина критического номинального давления q_{ax} , при которой упругий контакт сменяется хрупким, находится из уравнения

$$q_{ax} = \left(\frac{tm \nu \sigma}{2} \right)^{2\nu+1} \times \left[\frac{1,5 \pi I_e}{tm \nu (\nu-1) K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{2\nu}. \quad (3)$$

Износ в паре трения композиционный материал – однородный хрупкий материал выражен через параметры, принятые для абразивной обработки как производительность шлифования Q_t и величина удельного расхода алмазов q_V :

$$Q_t = \frac{S \nu t m R p}{2(\nu+1)n} \left[\frac{1,5 \pi q_a I_e}{tm \nu (\nu-1) K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{\nu+1}{\nu+0,5}} \frac{I_k}{I_e}; \quad (4)$$

$$q_V = 8,78 K \left[\frac{I_{ac}}{I_e} \right], \quad (5)$$

где I_k , I_{ac} – упругие постоянные материалов контрообразца и композиционного полупространства; S – ширина зоны износа; U – скорость взаимного перемещения образца и контрообразца; $n = 1$ – число циклов, приводящих к отделению частиц износа, для абразивного изнашивания [21, 22]. Упругая постоянная композиционного полупространства зависит от концентрации алмазного наполнителя τ и рассчитывается по формуле

$$I_{ac} = \frac{\tau(1-\mu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\tau)(1-\mu_c^2)}{E_c}, \quad (6)$$

где E_a , E_c – модули упругости материалов алмаза и матрицы; μ_a , μ_c – коэффициенты Пуассона материалов алмаза и керамической связки.

Результаты экспериментальных исследований. Проверка адекватности выбора модели поверхности и контактной задачи проводилась путем сопоставления

результатов трибоиспытаний и расчетов по формулам (1)–(6). В процессе эксперимента была реализована схема трения палец – кольцо на машине трения МТ-2 [17]. Образцы из композиционного материала были изготовлены по технологии [18, 19]. Материал контрообразца – электротехническая керамика ВаО-SiO₂-Al₂O₃. Исследовались свойства трибоконтакта в условиях сухого и граничного (смазка – вода) трения. Коэффициенты τ_0 и β были определены в соответствии с методикой [23]. Параметры микрогеометрии оценивались согласно ГОСТ 19300-86.

Расчет по формулам (1)–(3) в сопоставлении с результатами трибоиспытаний представлен на рис. 5. Исследования коэффициента трения проводились в отсутствие смазки. По результатам эксперимента f_y стабилен в докритическом диапазоне нагрузок, затем f_x быстро возрастает при увеличении нагрузки. Расчет по формуле (1) показывает снижение f_y при увеличении давления. Согласно теоретической зависимости (2) f_x возрастает при увеличении нагрузки, но менее существенно, чем установлено в результате эксперимента. Критическое давление, рассчитанное по формуле (3), $q_{ax} = 5,71$ МПа, по результатам эксперимента – 6,40 МПа, что соответствует относительной погрешности 11 %.

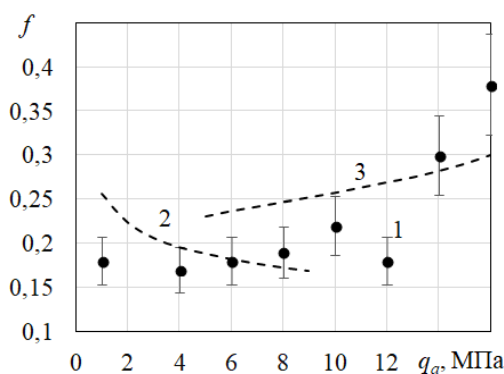


Рис. 5. Оценка коэффициента трения: 1 – результаты эксперимента для АКМ $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – расчет по формуле (1); 3 – расчет по формуле (2). Сухое трение

Результат проверки соотношений (4)–(6) показан на рис. 6 и 7.

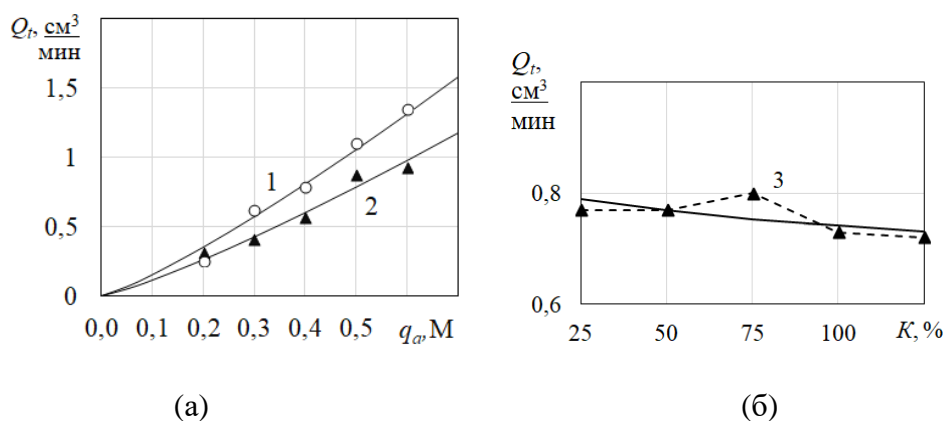


Рис. 6. Зависимость производительности шлифования от давления (а); от концентрации алмазов (б). Сплошные линии – расчет по формуле (4), точки – результаты эксперимента; 1 – $d = 100/80$, $K = 150$ %; 2 – $d = 63/50$, $K = 150$ %; 3 – результаты эксперимента $q_a = 0,5$ МПа, $d = 63/50$. Смазка – вода

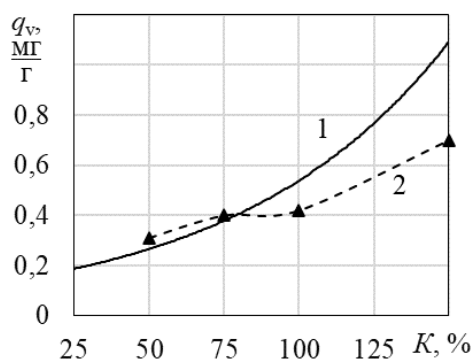


Рис. 7. Влияние концентрации алмазов на их удельный расход:
 1 – расчет по формуле (5); 2 – результаты эксперимента $q_a = 0,5$ МПа, $d = 63/50$,
 $K = 150$ %. Смазка – вода

Теоретический расчет и результаты эксперимента показали схожие тенденции изменения исследуемых величин. С увеличением давления производительность шлифования как характеристика износа контробразца возрастает, при использовании алмазов большего диаметра рост Q_t существеннее. С увеличением концентрации алмазов Q_t снижается незначительно. Удельный расход алмазов q_v , характеризующий износ композиционного материала, возрастает с увеличением концентрации алмазных включений.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Характеристики микрогеометрии поверхности [1] входят в соотношения, составляющие инженерную модель фрикционных параметров композиционного материала. Параметры ν , R_p , tm , K_3 описывают профиль рабочей поверхности детали и косвенно отражают размер алмазного зерна и структуру АКМ. Результаты решения контактной задачи показали, что классический подход [1, 21, 22] может применяться для оценки взаимодействия сопряженных поверхностей, одна из которых представляет собой двухкомпонентный композиционный материал. Расчеты согласно формулам (1)–(6) удовлетворительно коррелируют с результатами эксперимента.

2. Оценим, как изменяются параметры опорной кривой шероховатой поверхности АКМ: показатель степени ν и tm – относительная опорная длина на уровне средней линии. Диапазон изменения ν в зависимости от размера алмазного наполнителя и способа предварительной обработки поверхности трения композиционного материала от 1,5 до 3, параметр tm изменяется от 0,4 до 0,7.

3. Напрямую трактовать влияние концентрации и размера алмазного зерна на фрикционные параметры как влияние, например, R – радиуса сферического сегмента, некорректно, так как они определяют также механические свойства композиционного материала. Например, при увеличении линейного размера наполнителя снижается микропрочность и, хотя правый сомножитель в формуле (3) увеличивается, величина критического номинального давления практически не зависит от диаметра алмазного зерна. Увеличение концентрации алмазов снижает микропрочность АКМ. Параметр микропрочность σ необходимо определять дополнительно [24].

В соответствии с моделью контактного взаимодействия и выбранной моделью поверхности композиционного материала концентрация алмаза влияет на определение фрикционных параметров согласно (1)–(6) через эквивалентную упругую постоянную контакта АКМ – материал контробразца. Упругие постоянные I_e , I_a , I_c , I_k , I_{ac} рассчитываются теоретически и проверяются экспериментально [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено применение характеристик профиля поверхности для моделирования контактного взаимодействия двухкомпонентных композиционных материалов.

Показана правомерность применения классического подхода к решению контактных задач для двухкомпонентных поверхностей, в частности контакта алмазосодержащего керамического материала и керамического однородного полупространства. Справедливо в качестве композиционной поверхности принимать однородное полупространство из материала матрицы с расположенными в нем с заданной объемной плотностью сферическими сегментами одинакового радиуса, моделирующими включения из материала наполнителя глобулярной формы.

Размер наполнителя композиционного материала, в нашем случае диаметр алмазного зерна, влияет на фрикционные характеристики исследуемых материалов опосредованно, через параметры микрогеометрии поверхности R , v , R_p , tm . Диаметр алмазов влияет также на микропрочность материала. Концентрация алмазов определяет в первую очередь механические свойства композиционного материала (его упругие и прочностные характеристики).

Полученная на основе данного подхода инженерная модель может быть применена для определения фрикционных характеристик двух- и многокомпонентных композиционных материалов с наполнителями глобулярной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
2. Goryacheva I.G. Mechanics of discrete contact // *Tribology International*. 2006. V. 39. I. 5. P. 381–386.
3. ГОСТ 19300-86 Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1996. 10 с.
4. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Изд-во стандартов, 1973. 14 с.
5. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности: профильный метод. Термины, определения и параметры структуры: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: дата введения 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 21 с.
6. Vykov L., Ezhov A. Three-dimensional modeling microgeometry of contact pairs in technical systems // *Materials Science and Engineering*. 2020. V. 709. I. 2. P. 022057.
7. Палкин Д.Д., Чекалкин А.А. Численное моделирование коэффициентов трения однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2022. Т. 24. № 2. С. 54–63.
8. Бочкарева С.А., Панин С.В., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Гришаева Н.Ю., Матолыгина Н.Ю., Алексенко В.О. Моделирование фрикционного износа полимерных композиционных материалов с учетом температуры контакта // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22. № 1. С. 54–68.
9. Панин С.В., Бочкарева С.А., Алексенко В.О. Развитие и верификация модели изнашивания полимерных композитов с учетом микроструктуры, шероховатости контртела и фрикционного нагрева // *Математическое моделирование в естественных науках*. 2021. Т. 1. С. 114–116.

10. Apsan M.R., Mitu A.M., Pop N., Sireteanu T., Maxim V.M., Musat A. Analysis and Numerical Simulation of the Behavior of Composite Materials with Natural Fibers Under Quasi-Static Frictional Contact // *Journal of Composites Science*. 2025. № 9(7). P. 338.

11. 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.

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

13. 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.

14. Xia Y., Lu Y., Yang G., Chen C., Hu X., Song H., Wang B. Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology // *Materials*. 2023. № 16(7). P. 2710.

15. 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 P. 30010.

16. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные наноккомпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.

17. Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В. Моделирование износа пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика» // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 299–304.

18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2019. Вып. 12. С. 80–87.

19. 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.

20. Johnson K. L. Contact mechanics / Cambridge University Press, 2001. 452 p.

21. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 575 с.

22. Крагельский И.В., Добычин М.Н. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

23. Патент РФ 2525585. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностного слоя электропроводящего материала / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Гусев Д.А., Нестерова И.Н., Новоселова М.В. Заявл. 09.04.2013. Опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23.

24. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Effect of loading on tribotechnical characteristics of antifriction diamond-bearing mineral ceramics // *Materials Physics and Mechanics*. 2025. Т. 53. № 2. С. 104–112.

25. Demkin N.B., Sutyagin O.V., Tumanova O.O. Investigation of elastoplastic deformation of low-modulus coatings // *Friction and Wear*. 1994. V. 15. № 2. P. 237–242.

Для цитирования: Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н. Применение характеристик профиля поверхности для моделирования контактного взаимодействия композиционных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 59–69.

APPLICATION OF SURFACE PROFILE CHARACTERISTICS TO MODELING CONTACT INTERACTION OF COMPOSITE MATERIALS

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

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

The validity of the classical approach to solving contact problems for two-component composite surfaces based on the control of the microgeometry of the surface profile is shown. A homogeneous half-space of matrix material is considered as a composite surface, with spherical segments of the same radius located in it with a given volume density, simulating inclusions of a globular filler material. The profile of the composite half-space is an equivalent surface with a power-law distribution of the vertices of the micro-dimensions, similar to the reference curve of the material distribution of the real part. An engineering model for estimating the frictional characteristics of a triboassembly with composite materials has been tested in relation to the contact of a diamond-containing ceramic material and a ceramic homogeneous half-space. This model can be used to determine the friction characteristics of composite materials with globular fillers.

Keywords: microgeometry of the surface, contact problem, friction characteristics, composite materials, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2026; после рецензирования/revised: 10.02.2026;
принята/accepted: 11.02.2026

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-69-78

УДЕЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОНТАКТЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

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

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2026

На примере единичного и множественного контакта технических поверхностей проанализировано соответствие известных в трибологии линейных зависимостей, описывающих их фрикционное взаимодействие: удельной силы трения от фактического контактного давления и силы трения от внешней нормальной нагрузки (закон трения Кулона). Показано, что линейной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления в общем случае соответствует нелинейная зависимость силы трения от внешней нормальной нагрузки. Причина этой нелинейности – зависимость величины фактической площади контакта от нормальной контактной нагрузки. Однако в ограниченном диапазоне изменения последней эта нелинейность проявляется слабо, особенно для множественного контакта, поэтому зависимость силы трения от нормальной нагрузки можно адекватно описывать