

ФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

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

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

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

Экспериментально определены фрикционные характеристики ряда нитридных керамических материалов в паре со стальным контртелом при комнатной и повышенной температурах (до 450 °С): коэффициенты трения по Амонтону и Кулону и параметры удельной силы трения, выражающие ее зависимость от нормального напряжения в контакте. Для всех исследованных пар трения коэффициент трения по Амонтону убывает с ростом нормальной нагрузки в два и более раз. Коэффициент трения по Кулону определяли как коэффициент биноминальной линейной регрессионной зависимости силы трения от нормальной нагрузки, он постоянен для данной пары трения в данных условиях эксплуатации. Выявлена тесная корреляционная связь соответствующих параметров фрикционного взаимодействия на уровне напряжений и сил.

Ключевые слова: керамические материалы, трение, коэффициент трения, удельная сила трения, температура.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические материалы различного происхождения широко используются в современных технических устройствах. Нитридная керамика обладает рядом достоинств, таких как высокая твердость, износостойкость, устойчивость к температурному и химическому воздействию. Ее широко применяют в качестве защитных покрытий для деталей различного назначения, особенно работающих при повышенных температурах, в станкоинструментальной, электротехнической, аэрокосмической и других отраслях промышленности [1, 2].

Цель данной работы – исследовать фрикционные характеристики керамических материалов в паре со сталью при комнатной и повышенных температурах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Традиционные характеристики фрикционных свойств пары трения – сила и коэффициент трения. Следуя ГОСТ 27674-88, последний обычно определяют как отношение силы трения $F_{тр}$ к нормальной нагрузке N , что соответствует закону трения Амонтона

$$F_{тр} = f_A N.$$

Недостатком коэффициента трения по Амонтону является его зависимость от нормальной нагрузки, как правило наблюдаемая в экспериментах. Эта зависимость

практически исключает возможность использования данного коэффициента в расчетах фрикционных узлов, так как его справочное значение может отличаться от действительного в несколько раз.

Альтернативой закону трения Амонтона является двучленный закон трения Кулона

$$F_{mp} = F_0 + f_c N, \quad (1)$$

где F_0 – сила трения в отсутствии нормальной нагрузки на контакт; f_c – коэффициент трения по Кулону. Формулу (1) с точки зрения экспериментатора можно рассматривать как уравнение линейной регрессии величины силы трения (зависимой переменной) на величину нормальной нагрузки (независимой переменной). В таком случае коэффициент трения f_c по определению является величиной, не зависящей от нормальной нагрузки (по крайней мере, в заданном диапазоне нагрузок), и может служить фрикционной характеристикой данной пары трения в данных условиях эксплуатации. В этой работе именно коэффициент трения по Кулону наряду с параметром F_0 экспериментально определялся как характеристика исследуемой пары трения на уровне сил.

Наряду с силой трения сопротивление относительно движению контактирующих тел в трибологии часто оценивают удельной силой трения $\tau = \frac{F_{mp}}{A_r}$, где A_r – фактическая площадь контакта, на которой происходит непосредственное взаимодействие контактирующих тел (например, молекулярное). Максимальная удельная сила трения покоя, при которой контактирующие тела приходят в относительное движение, является аналогом критического напряжения сдвига в механике сплошных сред, при котором происходит разрушение тела и его части также приходят в относительное движение.

Удельная сила трения, как показывают эксперименты, также зависит от удельной нормальной нагрузки – фактического контактного давления p_r , которое представляет собой среднее нормальное напряжение на площадках фактического контакта. Эту зависимость выражают уравнением, по форме совпадающим с уравнением (1) для сил

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (2)$$

где параметр τ_0 аналогичен F_0 , а так называемый пьезокоэффициент β аналогичен коэффициенту трения f_c . Параметры τ_0 и β также приводятся в литературе [3], имеются исследования их зависимости от температуры для металлических материалов [4].

Уравнение (2) также можно считать уравнением линейной регрессии зависимой переменной τ на независимую переменную p_r и, соответственно, определить параметры τ_0 и β из экспериментальных данных.

В данной работе параметры исследуемых фрикционных пар определяли в единичном контакте с первоначальным касанием в точке по схеме: шаровой стальной индентор – плоская поверхность керамического материала, нанесенного на металлическую подложку.

Такая схема выгодна контролируемой величиной площади фактического контакта, которую при небольших контактных нагрузках и малой шероховатости

контактирующих поверхностей можно считать кругом с радиусом a , рассчитываемым по известной формуле Г. Герца

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где r – радиус шарового индентора; E^* – эквивалентный модуль упругости материалов контактирующих тел.

$$E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1},$$

где $E_1, 2$ и $\mu_1, 2$ – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное определение фрикционных характеристик керамических материалов проводили на микротрибометре [5]. Исследованы четыре керамических материала в виде покрытий на титане: нитрид титана TiN, нитрид циркония ZrN, нитрид молибдена Mo₂N и двухфазное покрытие на основе нитрида алюминия-кремния AlSiN. Покрытия толщиной 3...4 мкм наносили на титановую подложку методом физического ионно-плазменного осаждения на установке вакуумного катодно-дугового напыления с одновременной подачей в камеру реакционного газа – азота.

Плоский образец из титана с покрытием контактировал с шаровым индентором из стали ШХ15 диаметром 1 мм. Контактная нагрузка изменялась в пределах 0,196...3,92 мН (0,2...4 гс). При заданной нормальной контактной нагрузке измеряли максимальную величину статической силы трения. Повторность экспериментов была пятикратной.

Для проведения измерений силы трения при повышенной температуре оправку с плоским образцом помещали в электронагреватель. Температуру плоского образца измеряли термопарой, размещенной вблизи его поверхности. В ходе эксперимента заданная температура автоматически поддерживалась путем регулировки силы тока в спирали нагревателя с помощью электронного контрольно-следящего потенциометра. Исследован диапазон температур от комнатной (20 °С) до 450 °С.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных проходила следующим образом. По известным значениям максимальной силы трения покоя $F_{тр}$ и нормальной контактной нагрузки N находили зависимость $F_{тр}(N)$ и аппроксимировали ее линейной функцией вида (1). Коэффициенты F_0 и f_c определяли как параметры линейной регрессии зависимой величины $F_{тр}$ на независимую величину N . Затем, рассчитав величину фактической площади контакта $A_r = \pi a^2$, где a – радиус площадки контакта по формуле (3), находили при заданной нормальной нагрузке максимальную удельную силу трения покоя $\tau = \frac{F_{mp}}{A_r}$ и соответствующее фактическое контактное давление $p_r = \frac{N}{A_r}$. Получив таким образом эмпирическую зависи-

мость $\tau(p_r)$, аппроксимировали ее линейной функцией (2) и по ней определяли регрессионные коэффициенты τ_0 и β .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 приведены примеры типичных зависимостей коэффициентов трения по Амонтону $f_A(N)$ для двух пар трения. Как и ожидалось, для этих и всех других исследованных пар трения коэффициент трения f_A убывает с ростом нагрузки. Этот факт указывает на необходимость применения к исследованным парам трения закона трения Кулона (1). Величину F_0 в формуле, выражающей этот закон, обычно связывают с адгезионным взаимодействием контактирующих тел.

Действительно, примеры экспериментально полученных зависимостей максимальной силы трения покоя от нормальной нагрузки, приведенные на рис. 2, подтверждают их соответствие закону трения Кулона. Эмпирические зависимости $F_{тр}(N)$, приведенные на рис. 2, а также аналогичные зависимости для других исследованных пар, хорошо аппроксимируются линейными функциями вида (1) с коэффициентами корреляции, близкими к единице.

Фрикционные характеристики F_0 и f_c исследованных пар трения, определенные по описанной выше методике, приведены в табл. 1.

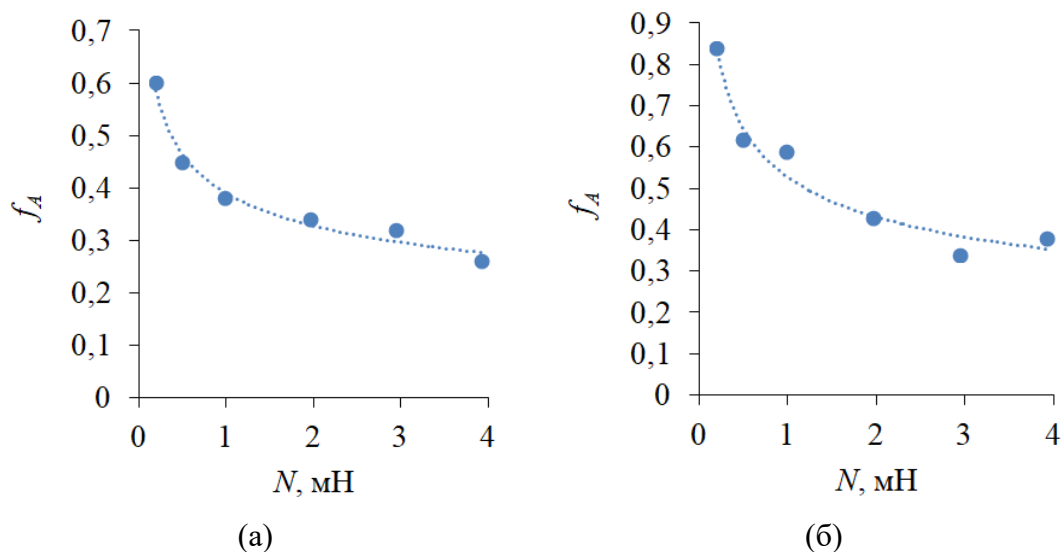


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения по Амонтону f_A от нормальной контактной нагрузки N для керамических материалов в паре со сталью: TiN при 300 °С (а); ZrN при 450 °С (б)

Прочерки в графе табл. 1 свидетельствуют о том, что данная величина статистически незначима. Для соответствующих пар трения можно считать $F_0 = 0$ и применять к ним закон трения Амонтона.

Типичные зависимости удельной силы трения τ от фактического контактного давления p_r показаны на рис. 3, а параметры удельной силы трения τ_0 и β , определенные по описанной выше методике, приведены в табл. 2.

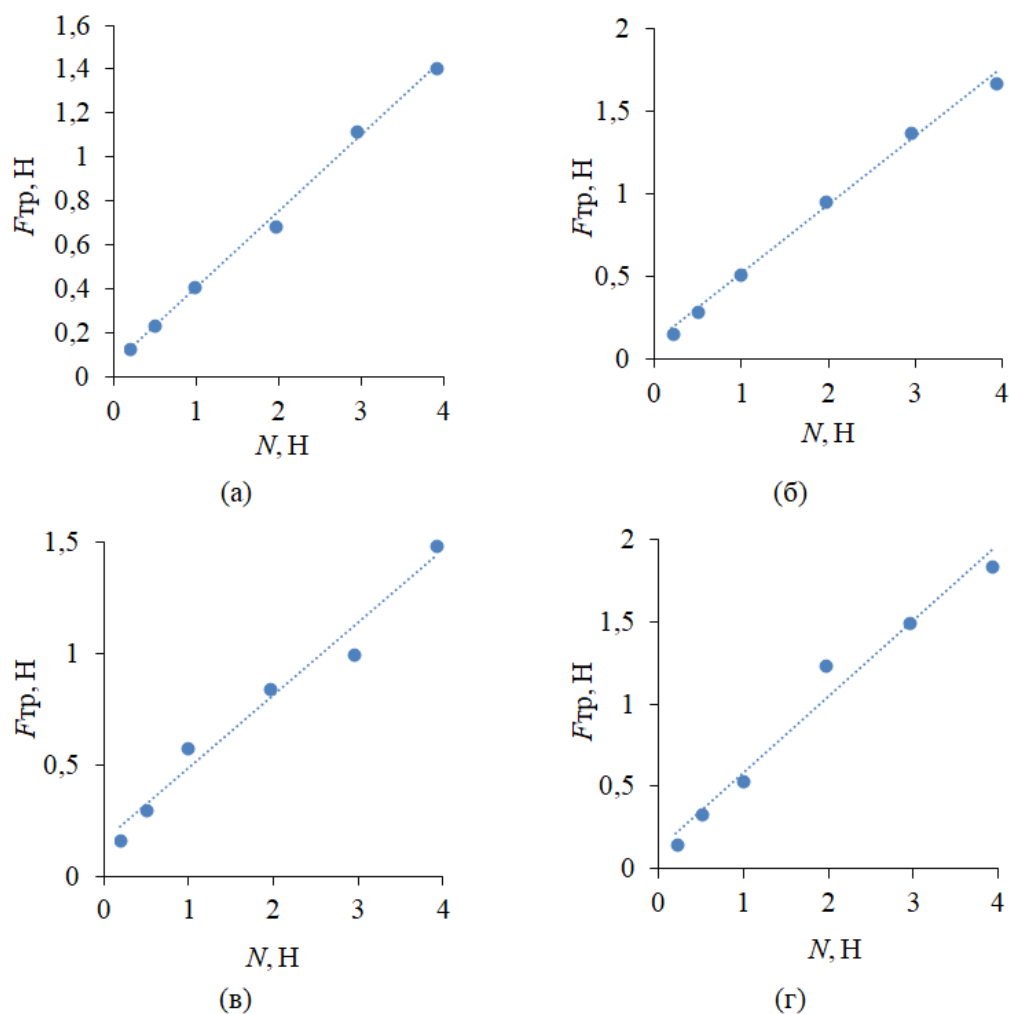


Рис. 2. Зависимости силы трения $F_{тр}$ от нормальной нагрузки N для керамических материалов в паре со сталью: TiN при 20 °C (а); Mo₂N при 300 °C (б); ZrN при 450 °C (в); AlSiN при 20 °C (г). Точки – экспериментальные результаты; пунктир – линейная аппроксимация

Таблица 1. Коэффициенты в законе трения Кулона (формула (1))

| Материал покрытия | Температура, °C | F_0 , мН | f_c |
|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| TiN | 20 | $0,62 \pm 0,022$ | $0,346 \pm 0,010$ |
| | 300 | $0,113 \pm 0,047$ | $0,254 \pm 0,022$ |
| | 450 | – | $0,400 \pm 0,026$ |
| ZrN | 20 | – | $0,412 \pm 0,029$ |
| | 300 | $0,137 \pm 0,046$ | $0,282 \pm 0,021$ |
| | 450 | $0,158 \pm 0,060$ | $0,327 \pm 0,027$ |
| Mo ₂ N | 20 | $0,182 \pm 0,073$ | $0,223 \pm 0,030$ |
| | 300 | $0,107 \pm 0,030$ | $0,416 \pm 0,014$ |
| | 450 | $0,238 \pm 0,073$ | $0,335 \pm 0,030$ |
| AlSiN | 20 | $0,122 \pm 0,079$ | $0,463 \pm 0,036$ |
| | 300 | $0,101 \pm 0,036$ | $0,316 \pm 0,016$ |
| | 450 | – | $0,584 \pm 0,048$ |

Зависимость удельной силы трения от фактического контактного давления в большинстве случаев также успешно аппроксимируются линейной функцией, однако с

меньшим коэффициентом корреляции (но не менее 0,85). В четырех случаях величина коэффициента β оказалась статистически незначима (см. прочерки в табл. 2). В этом случае удельную силу трения можно считать не зависящей от фактического контактного давления. В двух случаях величина параметра τ_0 оказалась статистически незначимой, т.е. удельную силу трения можно считать прямо пропорциональной фактическому контактному давлению.

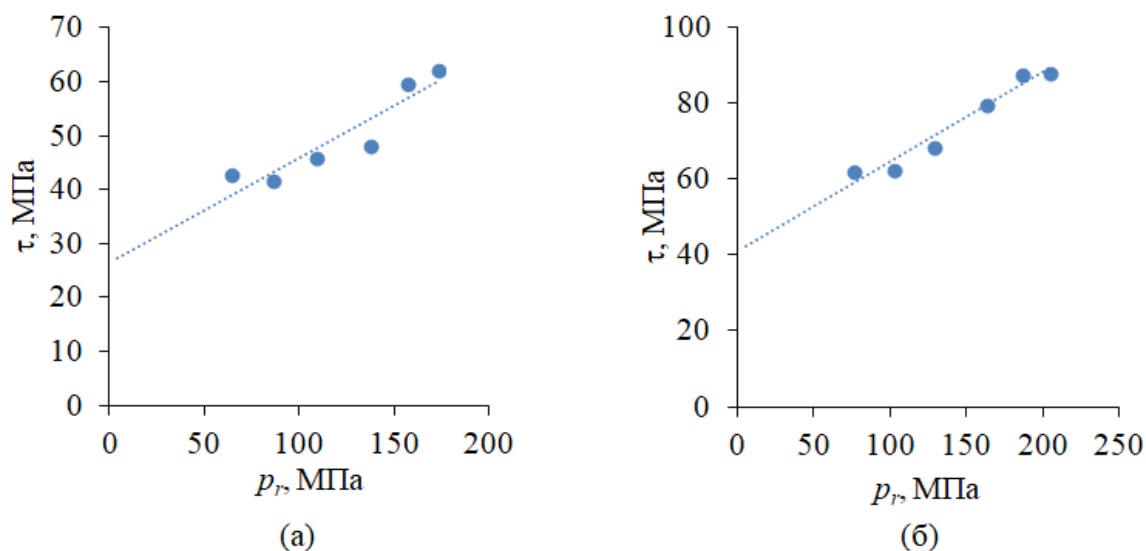


Рис. 3. Зависимость удельной силы трения τ от фактического контактного давления p_r для керамических материалов в паре со сталью: TiN при 20 °С (а); Mo₂N при 300 °С (б). Точки – экспериментальные результаты; пунктир – линейная аппроксимация

Таблица 2. Параметры удельной силы трения

| Материал покрытия | Температура, °С | τ_0 , МПа | β |
|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| TiN | 20 | $26,5 \pm 5,2$ | $0,19 \pm 0,040$ |
| | 300 | $31,8 \pm 3,6$ | $0,096 \pm 0,028$ |
| | 450 | $17,2 \pm 9,0$ | $0,30 \pm 0,070$ |
| ZrN | 20 | – | $0,37 \pm 0,081$ |
| | 300 | $63,1 \pm 9,9$ | – |
| | 450 | $75,5 \pm 11,2$ | – |
| Mo ₂ N | 20 | $45,4 \pm 10,1$ | – |
| | 300 | $41,0 \pm 4,0$ | $0,24 \pm 0,026$ |
| | 450 | $82,4 \pm 20,2$ | – |
| AlSiN | 20 | $44,5 \pm 15,0$ | $0,33 \pm 0,076$ |
| | 300 | $62,4 \pm 11,3$ | $0,090 \pm 0,058$ |
| | 450 | – | $0,45 \pm 0,14$ |

Наблюдается тесная корреляция соответствующих фрикционных параметров исследованных пар трения на уровне сил и на уровне напряжений: между параметрами β и f_c с коэффициентом корреляции $R = 0,80$, а между параметрами τ_0 и F_0 с коэффициентом корреляции $R = 0,84$. При этом величина коэффициента β всегда меньше соответствующей величины коэффициента трения по Кулону f_c .

В среднем с ростом температуры наблюдается увеличение параметров τ_0 и f_c ; выраженной зависимости параметра β от температуры не обнаружено. В этом

направлении требуются дополнительные исследования для увеличения объема статистических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование фрикционных характеристик керамических покрытий в паре со стальной поверхностью показало, что на уровне сил фрикционное взаимодействие адекватно описывается двучленным законом трения Кулона, на уровне напряжений – также двучленным линейным выражением, связывающим удельную силу трения с фактическим контактным давлением.

Обнаружена тесная корреляционная связь соответствующих параметров фрикционного взаимодействия на уровне напряжений и сил, а именно: коэффициента трения по Кулону f_c и параметра удельной силы трения β , а также параметра F_0 в законе трения Кулона и параметра удельной силы трения τ_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Д.А., Будиновский С.А., Горлов Д.С. Разработка функциональных ионно-плазменных покрытий на основе многослойных гетерогенных структур нитридов металлов // *Труды ВИАМ*. 2021. № 8 (102). С. 34–42.
2. Ерофеев В.И., Кривина Л.А., Тарасенко Ю.П., Царева И.Н. Ионно-плазменная технология нанесения износостойкого покрытия нитрида титана // *Станкоинструмент*. 2018. № 2 (011). С. 60–63.
3. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
4. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 200 с.
5. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А. Заявл. 25.12.1998. Оpubл. 10.06.2000, Бюл. № 16.

Для цитирования: Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Фрикционные характеристики керамических материалов при повышенных температурах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 52–59.

FRICIONAL CHARACTERISTICS OF CERAMIC MATERIALS AT HIGHER TEMPERATURES

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The friction characteristics of a number of nitride ceramic materials paired with a steel counterbody were experimentally determined at room and elevated temperatures (up to 450 °C). These included the Amonton and Coulomb friction coefficients and the parameters of specific friction force, expressing its dependence on the normal stress in the contact. For all the friction pairs studied, the Amonton friction coefficient decreases by a factor of two or more with an increase in the normal load. The Coulomb friction coefficient was determined as the coefficient of the binomial linear regression dependence of friction force on the normal

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/ revised: 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 государственной технической 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