

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 20-27.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 20-27.

Научная статья
УДК 621.2.082.18
doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-27

Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения

Виктор Петрович Тихомиров¹, д.т.н.
Михаил Геннадьевич Шалыгин², д.т.н.
Михаил Александрович Измеров³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия
¹ dm-bgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7269-8175>
² migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>
³ m.izmerov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В зависимости от уровня масштаба измерения сила трения меняет свою природу и определяется разными зависимостями. В работе рассмотрена процедура определения молекулярной составляющей силы трения на основе оценки удельного сопротивления срезу молекулярных связей при упругом взаимодействии иглы кантилевера из нитрида кремния со стальным образцом при сканировании участка поверхности образца в нанометровом диапазоне на атомно-силовом микроскопе AFM «FemtoScan» при малых нагрузках. Зонд атомного силового микроскопа действует как силовой датчик для измерения, в частности, нормальной нагрузки, и изменение силы, прикладываемой к кантилеверу при известной жесткости и величины деформации стержня кантилевера, изменяет нагрузку и на зонд (для оценки молекулярной составляющей силы трения выбиралась трасса самой «гладкой» поверхности). Также в работе дана аналитическая оценка параметров контактного взаимодействия иглы кантилевера в нано-масштабе, представленного в виде сферического индентора, с упругим полупространством, представляющим собой исследуемую поверхность, на основе теории Герца. Анализ данных расчёта и эксперимента по измерению силы сопротивления перемещению индентора при сканировании исследуемой поверхности показал хорошую сходимость результатов с отклонением расчётных значений от данных эксперимента не более 7,5%. Расчёты по установленным формулам показали, что с ростом нагрузки на контакт на наноуровне коэффициент трения снижается из-за более быстрого роста пятен контакта в упругом состоянии (при условии, что наклон неровностей, относящихся к субшероховатости, остается постоянным), что также было подтверждено в процессе эксперимента.

Ключевые слова: адгезия, коэффициент трения, контактная нагрузка, шероховатость, упругий контакт

Для цитирования: Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-27

Contact model and evaluation of friction force molecular component

Viktor P. Tikhomirov¹, D.Eng.
Mikhail G. Shalygin², D.Eng.
Mikhail A. Izmerov³, C.Eng.

^{1, 2, 3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia
¹ dm-bgtu@yandex.ru
² migshalygin@yandex.ru
³ m.izmerov@yandex.ru

Abstract. According to the level of the measurement scale, the friction force changes its nature and is determined by different dependencies. The paper views a procedure for determining a friction force molecular component based on the evaluation of specific shearing resistance of molecular links under the elastic interaction of a silicon nitride cantilever needle having a steel sample, used for scanning a section of a sample surface in the nanometer range with an atomic force microscope (AFM) «FemtoScan» under low loads. A sensitive element (measuring device) of an atomic force microscope acts as a force sensor for measuring both: a normal load very roughly, and a change in the force, applied to the cantilever under known stiffness, including the value of the cantilever rod form alteration. It also changes the load on the sensitive element (to assess the molecular component of the friction force, the route of the «smoothest» surface itself was chosen). The paper also provides an analytical assessment of the contact interaction parameters of a cantilever needle in a nano-scale, represented as a spherical indenter, with an elastic half-space as a surface under study, based on the Hertz theory. Analysis of the calculation and experiment data on measuring the resistance force of the indenter during scanning of the surface under study, showed good convergence of the results with a deviation of even values from the experimental data of no more than 7,5 %. Calculations using the established formulas showed that with an increase in the load on the contact at the nanoscale, the coefficient of friction decreases due to a faster growth of contact spots in the elastic state (provided that angularity of inequalities related to sub-roughness remains constant), which was also confirmed in the course of the experiment.

Keywords: adhesion, slip coefficient, contact load, roughness, elastic contact

For citation: Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A. Contact model and evaluation of friction force molecular component / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-27

Введение

В настоящее время, требования к качеству поверхностей ужесточаются, и они становятся более «гладкими». При увеличении площади контакта поверхности находятся при малых давлениях, таких как микро электромеханические системы (MEMS) и нано электрические системы (устройства NEMS). Размеры пятен контакта шероховатых поверхностей, которые определяют фактическую область контакта, уменьшаются, достигая нанометрового масштаба [2]. Таким образом, становится важно понять, как свойства материалов и топографические особенности поверхностей влияют на силы трения в нано масштабе.

Сила трения F_f является тангенциальной силой сопротивления относительно движению двух поверхностей, которые прижаты друг к другу нормальной силой. Амонтон, в 1699 г., и Кулон в 1785 г., развили феноменологическое понимание сухого трения между двумя телами, находящимися в относительном движении. Трение по Амонтону-Кулону характеризуется тем, что отношение силы трения (во время скольжения) к нормальному действию силы F_N является константой, названной коэффициентом кинетического трения f . Так же коэффициент статического трения – отношение максимальной

силы сдвига в пределах предварительного смещения к нормальной силе. Эксперименты показывают, что статическое трение несколько больше, чем динамическое трение. Несмотря на то, что феноменологически закон трения выражается простой зависимостью

$$F_f = fF_N,$$

природа силы трения недостаточно хорошо понята.

Трение шероховатых поверхностей

Адгезионная теория трения Боудена-Тейбора связывает шероховатость с трением другим способом [4]. Поскольку реальные поверхности всегда обладают определенной степенью шероховатости, то контакт между двумя телами происходит на отдельных пятнах. Таким образом, реальная область контакта обычно будет намного меньше, чем очевидная область контакта и среднее нормальное напряжение в реальной области контакта может превысить твердость материала. Если каждое пятно при взаимодействии шероховатых поверхностей находится в пластическом состоянии, то нормальное напряжение контакта постоянное, и фактическая область контакта пропорциональна нормальной силе. Таким образом, адгезионная теория

трения, которая определяет силу трения, пропорциональную реальной области контакта, также дает необходимую пропорциональность между силой трения и нормальной силой, что соответствует теории трения Амонтона-Кулона. Однако даже в отсутствие пластической деформации, реальная область контакта почти пропорциональна нормальной силе, если у высот неровностей есть статистическое распределение высот (Гринвуд и Вильямсон, [5]). Таким образом, Тейбор [4] указал на следующие три основных фактора, влияющих на трение несмазанных твердых тел:

1. Фактическая площадь контакта между поверхностями.
2. Тип и сила молекулярной связи взаимодействующих твердых тел.
3. Сдвиг и разрыв материала в области контакта.

Эти основные факторы могут быть сильно зависимы от присутствия окисных пленок, размеров пятен контакта и температурных эффектов. При рассмотрении закономерностей трения следует различать модели контакта отдельных неровностей, т. е. поведение отдельного пятна контакта, нагруженного нормальной и тангенциальной силами, а также модели, состоящие из множества пятен касания. Важным представляется нахождение ответа на вопрос – если известен закон (закономерность) трения на отдельном пятне контакта, то будет ли он адекватен для множественного контакта. Анализ литературных данных указал на неоднозначность этого утверждения.

Известное решение для отдельного контакта между двумя упругими телами было развито в конце девятнадцатого века Герцом. Для множественного контакта были разработаны различные статистические модели. Модель *GW* (Гринвуда-Вильямсона, [5]) рассматривает упругий контакт между шероховатой и гладкой поверхностью, полагая, что:

- 1) грубая поверхность изотропная;
- 2) неровности в своей верхней части сферические;
- 3) все вершины выступов шероховатости имеют один и тот же радиус кривизны, в

то время как их высоты варьируются случайным образом;

4) отсутствует взаимодействие между соседними пятнами контакта;

5) деформация основания неровностей отсутствует.

Гринвуд и Трипп [6] показали, что контакт двух шероховатых поверхностей может быть заменен контактом тела, имеющего эквивалентную шероховатость, с гладкой поверхностью. Одним из интересных и важных результатов, полученных с помощью модели *GW*, состоит в том, что фактическая площадь контакта примерно пропорциональна нормальной силе. Таким образом, если удельное сопротивление срезам τ молекулярных связей постоянно, то сила трения пропорциональна реальной области контакта, и, следовательно, сила трения будет примерно пропорциональна нормальной силе:

$$F_f = \tau A_r; A_r \propto F_N.$$

Анализ приведенных выше соотношений показал [3], что коэффициент трения практически не зависит от нормальной нагрузки. Однако экспериментальные данные показывают, что существуют отклонения в оценке трения, когда область контакта изменяется от микро- до нано-масштаба. Эксперименты, в которых сила трения измеряется, используя атомный силовой микроскоп (AFM), показывают, что сила трения может быть не пропорциональной нормальной силе. Типичный радиус контакта для зонда AFM оценивается величиной < 25 нм, тогда как измерение шероховатости инженерных поверхностей производится зондом (щупом) радиусом $5 \dots 10$ мкм.

Профили поверхности, измеренные разными способами (с разными размерами зонда) показаны на рис. 1. Так как модели поверхности строятся на основании анализа топографических параметров, то использование данных измерения поверхности зондами разных размеров при решении задач контактной механики могут привести к получению неадекватных результатов.

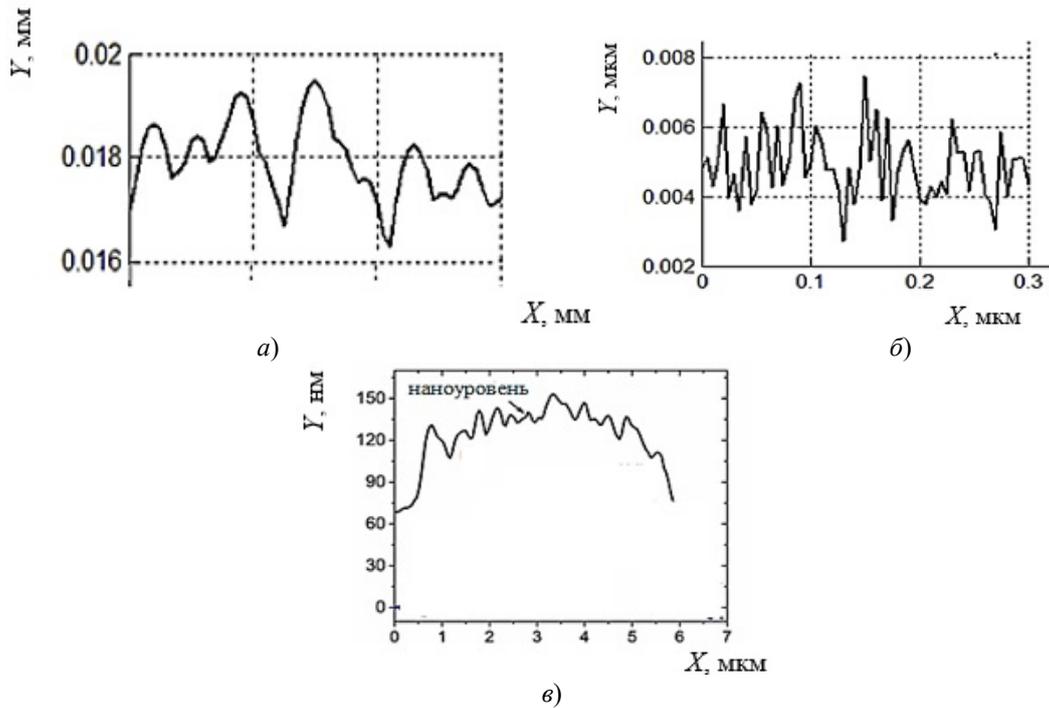


Рис. 1. Профилограммы поверхности:
а – радиус шупа 100 мкм; б – радиус шупа 5 мкм; в – профиль на наноуровне с радиусом иглы 30 нм [1]

Нано уровень шероховатости

Микровзаимодействия отдельных неровностей (вверху) и нано взаимодействие между зондом атомного силового микроскопа (AFM) и исследуемой поверхностью представлены на рис. 2.

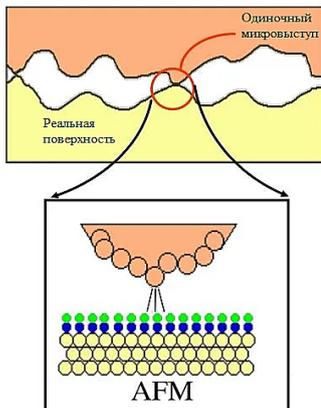


Рис. 2. Разный уровень взаимодействия твердых тел

Целью исследования было установить сдвиговую прочность молекулярных соединений и зависимость трения от нагрузки.

Исследования на атомно-силовом микроскопе AFM «FemtoScan»

Зонд атомного силового микроскопа действует как силовой датчик для измерения, в

частности, нормальной нагрузки. Изменение силы, прикладываемой к кантилеверу (рис. 3) [7], при известной жесткости и величине деформации стержня кантилевера, изменяет нагрузку и на зонд (в данном примере нагрузка на зонд составляла 1,0 нН). Для оценки молекулярной составляющей силы трения выбиралась трасса самой «гладкой» поверхности.

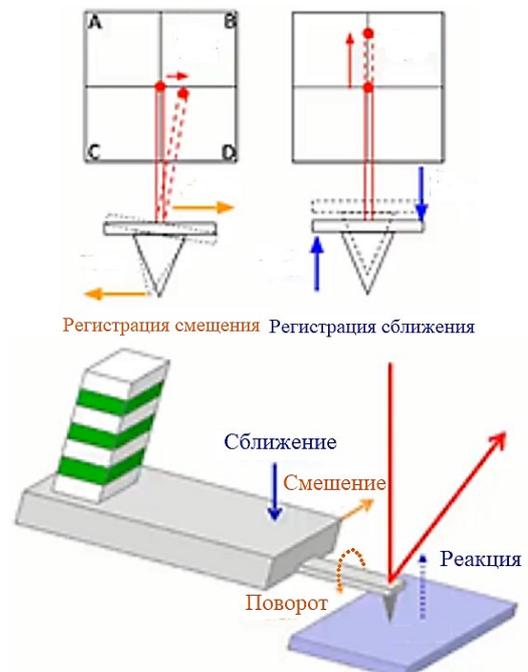


Рис. 3. Силовые нагрузки на иглу кантилевера в процессе измерения

Сила трения измерялась за счет фиксации отклонения кантилевера во время

прохождения зонда по поверхности в прямом и обратном направлениях (рис. 4).

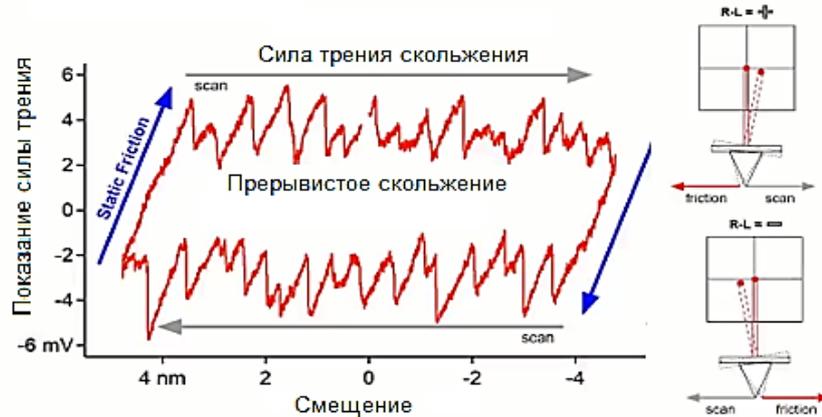


Рис. 4. Результат измерения силы трения

Атомно-силовой микроскоп AFM «FemtoScan» представлен на рис. 5. Образец помещается в микроскоп на подвижный стол и подводится вверх к игле кантилевера из нитрида кремния с радиусом закругления 20 нм. При заданной нагрузке на кантилевер, например, в 1,0 нН, происходило сканирование поверхности образца и запись его трёхмерной топографии на уровне субмикрощероховатости на участке размером 9,5x9,5 мкм с шагом в 20 нм с регистрацией силы трения в виде отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном проходе.

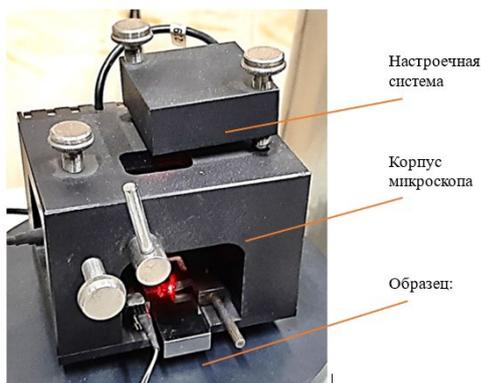


Рис. 5. Атомно-силовой микроскоп AFM «FemtoScan»

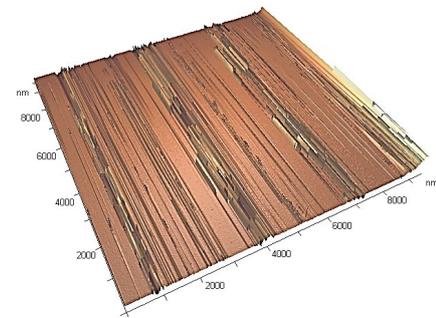


Рис. 6. Топография участка поверхности

С помощью атомного силового микроскопа получена топография участка поверхности образца и проведен анализ исследуемого участка. Характеристика зонда и нагрузочного на кантилевер режима были следующими: радиус зонда равен 20 нм; материал зонда – нитрид кремния; нагрузка на зонд составляла 1,0 нН. Участок 3D поверхности показан на рис. 6.

Профиль поверхности (рис. 7) дает возможность оценить параметры нано-шероховатости.

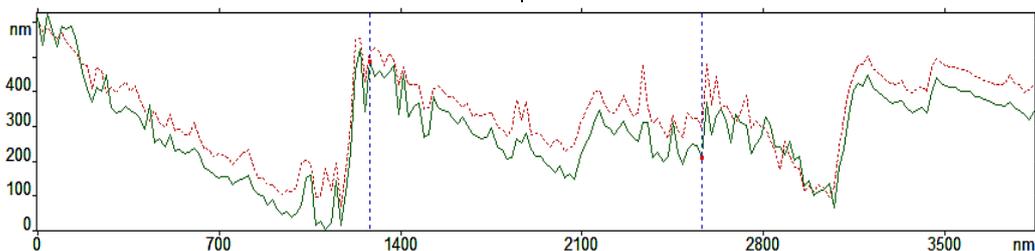


Рис. 7. Профиль поверхности

Испытания были проведены с образцом из стали 45. В результате получена следующая картина изменения силы трения (рис. 8) при

движении в прямом и обратном направлениях (гистерезис).

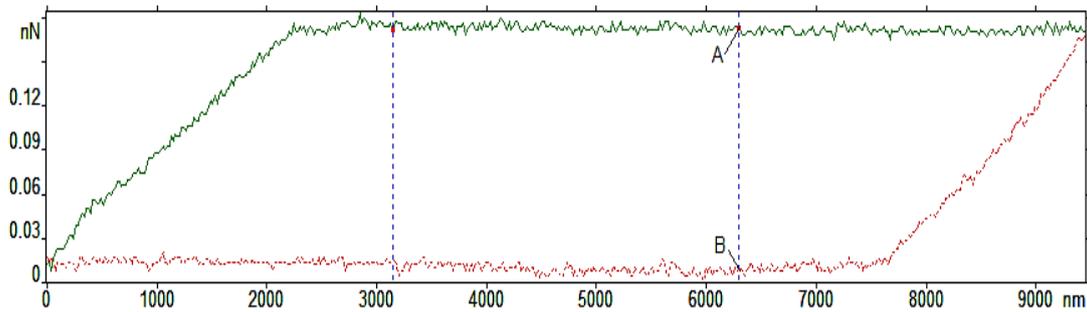


Рис. 8. Зависимость силы трения в прямом и обратном направлениях (сила трения равна половине отрезка *AB* и составляет 0,078 нН)

Рассмотрим контактное взаимодействие поверхности из стали 45 и иглы, изготовленной из нитрида кремния. Физико-механические характеристики материалов иглы и поверхности

приняты в соответствии с табл. 1. Модель контактного взаимодействия [7] представлена на рис. 9.

1. Физико-механические характеристики

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона μ
Сталь	$2,0 \cdot 10^5$	0,3
Нитрид кремния Si_3N_4	$3,4 \cdot 10^5$	0,3

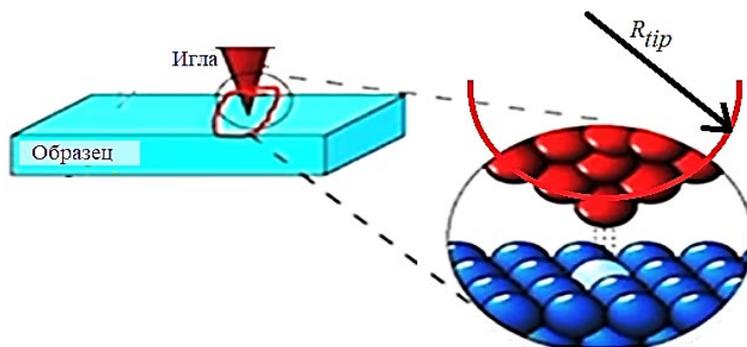


Рис. 9. Модель взаимодействия

Дадим оценку параметров контактного взаимодействия иглы с упругим полупространством. Исходные данные расчёта, следующие: радиус иглы $R_{tip} = 20$ нм; нагрузка на

иглу $F_N = 1,0$ нН.

Приведем результаты расчета, основанные на упругом контактном взаимодействии иглы кантилевера и поверхности образца:

- приведенный модуль упругости:

$$E_{tot} = \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1 - 0,3^2}{2,0 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,3^2}{3,4 \cdot 10^5} \right) \right]^{-1} = 1,845 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2;$$

- радиус площадки контакта по Герцу:

$$r_{Hertz} = \left(\frac{R_{tip} F_N}{E_{tot}} \right)^{1/3} = \left(\frac{20 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}{1,845 \cdot 10^{11}} \right)^{1/3} = 4,767 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,4768 \text{ нм};$$

- величина сближения:

$$\delta_{Hertz} = \frac{r_{Hertz}^2}{R_{tip}} = \frac{0,4768^2}{20} = 0,011 \text{ нм};$$

- контактное давление:

$$p = \frac{F_N}{\pi r_{Hertz}^2} = \frac{1 \cdot 10^{-9}}{\pi \cdot 0,4768^2} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Н/нм}^2 = 1400 \text{ МПа};$$

- площадь «пятна» контакта:

$$a_{nano} = \pi r_{Hertz}^2 = \pi \cdot 0,4768^2 = 0,714 \text{ нм}^2;$$

- удельное сопротивление срезу молекулярных связей:

$$\tau = \frac{F_f}{a_{nano}} = \frac{0,078 \cdot 10^{-9}}{0,714 \cdot 10^{-12}} = 109 \text{ МПа}.$$

Коэффициент трения [8, 10], как аддитивная величина, определяется выражением:

$$f = \frac{\tau}{p} + \text{tg}\theta_{nano}.$$

Результаты эксперимента

Результаты проведенного эксперимента на атомно-силовом микроскопе по измерению силы трения между образцом и иглой при разной нагрузке на иглу кантилевера представлены на рис. 10. Результаты расчета по представленным выше зависимостям для приведенного образца даны пунктирной линией.

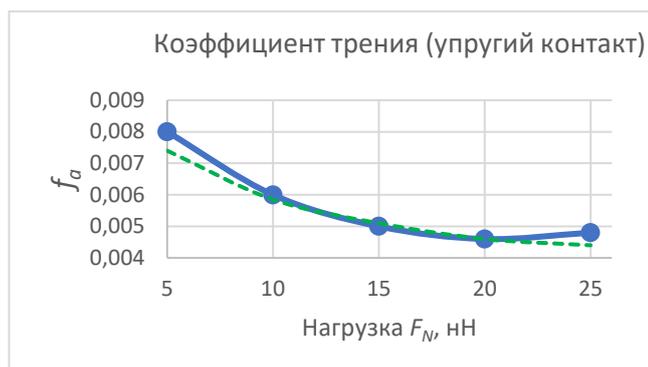


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения от нагрузки на нано уровне

Анализ полученного выражения показывает, что с ростом нагрузки коэффициент нано-трения падает (при условии, что наклон неровностей, относящихся к субшероховатости, остается постоянным).

Выводы

Таким образом, в работе рассмотрена процедура определения удельного сопротивления срезу молекулярных связей и показано, что с ростом нагрузки на контакт на наноуровне коэффициент трения снижается, что подтверждается экспериментальными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трошин А.А. Математическая модель измерения шероховатости сферическим щупом / А.А. Трошин, О.В. Захаров / Вестник БГТУ, 2020. №2 (87). С. 28–33.
2. Буяновский И. А., Левченко В. А., Самусенко В.Д. Исследование структуры, состава и трибологических характеристик наноструктурных монокристаллических покрытий, полученных ионно-плазменным методом // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 4 (130). С. 41–48.
3. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Кузнецов С.В., Горностаева А.Г. Трение металл-металлических поверхностей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 3 (129). С. 40–48.
4. Tabor D. Friction – the present state of our understanding. // ASME journal of lubrication technology, 1981. Vol. 103. pp. 169–179.
5. Greenwood J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson / Proceedings of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences, 1966. Vol. 295. № 1442. pp. 300–319.
6. Greenwood J.A. The contact of two nominally flat rough surfaces / J.A. Greenwood, J.H. Tripp / Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1971. № 185. pp. 625–633.

7. Adams G.G. A nano-scale multi-asperity contact and friction model / G.G. Adams, S. Müftü, N.M. Azhar / Journal of tribology, ASME transactions, 2002. P. 1–21.

8. Измеров М.А. Изнашивание фрактальных поверхностей при малых нагрузках / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров, А.Г. Горностаева // Сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей. Брянск, 2022. С. 38–42.

9. Маджумдар А. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей / А. Маджумдар, Б. Бхушан // Современное машиностроение. Сер. Б., 1991. № 6. С.11–23.

10. Измеров М.А., Тихомиров В.П. Трение фрактальных поверхностей // Транспортное машиностроение. 2022. № 1-2 (1-2). С. 20–28.

REFERENCES

1. Troshin A.A. Mathematical model of roughness measurement using a spherical probe / A.A. Troshin, O.V. Zakharov / Bulletin of BSTU, 2020, no. 2 (87), pp. 28–33.

2. Buyanovskiy I. A., Levchenko V. A., Samusenko V.D. Investigation of the structure, composition and tribological characteristics of nanostructured monocrystalline coatings obtained by ion plasma technology / Science-intensive technologies in machine-building, 2022, no. 4 (130), pp. 41–48.

3. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Kuznetsov S.V., Gornostaeva A.G. Friction of metal surfaces / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 3 (129), pp. 40–48.

4. Tabor D. Friction – the present state of our understanding. // ASME journal of lubrication technology, 1981. Vol. 103. pp. 169–179.

5. Greenwood J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson / Proceedings of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences, 1966. Vol. 295. № 1442. pp. 300–319.

6. Greenwood J.A. The contact of two nominally flat rough surfaces / J.A. Greenwood, J.H. Tripp / Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1971. № 185. pp. 625–633.

7. Adams G.G. A nano-scale multi-asperity contact and friction model / G.G. Adams, S. Müftü, N.M. Azhar / Journal of tribology, ASME transactions, 2002. P. 1–21.

8. Izmerov M.A. Wear process of fractal surfaces at low loads / M.A. Izmerov, V.P. Tikhomirov, A.G. Gornostaeva / Collection of scientific articles of the 14-th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists. Bryansk, 2022, pp. 38–42.

9. Majumdar A. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan. Modern machine-building. Ser. B., 1991, no. 6, pp.11–23.

10. Izmerov M.A., Tikhomirov V.P. Friction of fractal surfaces / Transport engineering, 2022, no. 1-2 (1-2), pp. 20–28.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 08.02.2023

The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; assepted for publication 08.02.2023

