

Основные фазовые и структурные изменения при облучении идут в приповерхностном слое облученной ионами стали 12X18H10T и в примыкающем к покрытию слое стали 3. Одной из главных причин, приводящих к упрочнению данных сталей при облучении, является образование фаз мартенсита за счет деформации поверхности, отмечается также деформационное упрочнение. Основными факторами, определяющими изменения микроструктуры и свойств сталей, являются параметры облучения.

References

1. Kadyrzhanov K.K., Komarov F.F. et al. Ion-beam and Ion-plasma Modification of Materials. — M.: MSU Press, 2005. — P. 640.
2. Maksimkin O.P., Kadirov Kh.G. et al. Defective structure of a steel 12X18H10T, subjected to an irradiation pulse electronic streams and to deformation // FMM. — 2004. — P. 97. — Vol. 4. — P. 1–4.
3. Zhdan G.T., Kadirov Kh.G. et al. Change of structure and mechanical properties of a steel 12X18H10T, by irradiated powerful pulse beams electrons // Izvestiya VUZov. Ser. physical and mathematical. — 1999. — № 2. — P. 47–54.
4. Pogrebnyak A.D., Kylyshkanov M.K., Alontseva D.L. Structure and properties of materials and composite coatings before and after exposure to concentrated energy flow. — Ust-Kamenogorsk: EKSTU, 2008. — P. 296.
5. Azarenkov N.A., Bersenev V.M., Pogrebnyak A.D. Structure and properties of sheetings and the modified layers of materials. — Kharkov: KhNU, 2007. — P. 560.
6. Celik E. Corrosion behavior of plasma sprayed coatings / E.Celik, I.Ozdemir, E.Avcı and Y.Tsunekawa // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 193. — P. 297–302.
7. Pogrebnyak A.D., Ruzimov Sh.M. et al. Structure and properties of coatings on Ni base deposited using a plasma jet before and after electron a beam irradiation // Vacuum. — 2007. — Vol. 81. — P. 1243–1251.
8. Alontseva D.L. Structure and properties of Ni-Cr based coatings after duplex treatment // Izvestiya VUZov. Ser. Fizika. — 2009. — № 8/2. — P. 376–380.
9. Pischasov N.I., Nicolaev A.V. Modifying of structure and properties of solid alloys of system WC-Co by heavy current beams of the charged particles // Vestnik of Omsk University. — 1996. — № 2. — P. 39–43.

УДК 538.95.405

Некоторые вопросы физики сухого трения

Some questions of physics of dry friction

Юров В.М., Гученко С.А.

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru)

Физика қасиеттерін және бетінің геометриясын есепке алатын үйкеліс коэффициенті үшін теңдік алынды. Біркелкі қос металдарды антифрикционды қосарланған үйкелісін қолданбау бойынша нәтиже жасалынды. Үстірт энергиясының кемуі арқылы құрғақ үйкелісін азайтуға болатыны көрсетілді. Электрондардың шығу жұмысы өзгеше болып келетін қос үйкеліс қолданылады. Бұл потенциалдардың ұштасуының әр түрлігіне және осыған байланысты үстірт энергиясының азаюына әкеп соғады. Үйкеліс коэффициенті беттің термодинамикалық күйінен тәуелді екені көрсетілді.

Expression for factor of the friction, taking into account geometry of a surface and its physical properties is received. The conclusion that it is impossible to use homogeneous pairs metals in antifrictional pairs friction is made. It is shown, that reduction of factor of dry friction is possible due to reduction of superficial energy. Thus pairs friction at which work of an exit of electron considerably differs are used. It results in distinction in a contact potential difference and, accordingly, to reduction of superficial energy. It is shown, that the factor of friction depends on a thermodynamic condition of a surface.

Введение

Основной механизм трения в вакууме (при отсутствии смазочных пленок) — это адгезия очень малых контактных поверхностей с последующим разрушением образованных при этом адгезионных мостиков связи при сдвиге одной поверхности относительно другой.

Чрезвычайно низкая скорость восстановления поверхностных пленок в космическом вакууме за счет окисления, вызванная очень низким содержанием кислорода в окружающей среде, увеличивает трение и способствует большему износу материалов.

Все более широкое применение находят покрытия различными материалами поверхностей трения. Такие покрытия улучшают работу узлов трения, работающих как со смазкой, так и в условиях сухого трения.

Тонкие металлические пленки занимают важное место в ряду такого рода покрытий. Соответствующим подбором металла покрытия и его толщины можно обеспечить работоспособность подшипников сухого трения в глубоком вакууме, при высоких температурах, доходящих до 1000 °С.

Анализ состояния вопроса

Первое исследование трения твердых тел с металлическими покрытиями было проведено Ф.Боуденом в 1939 г. [1]. Согласно Боудену, при соприкосновении твердых тел, находящихся под действием сжимающей нагрузки, в местах их фактического касания образуются прочные соединения. Сила трения, развиваемая в таком соединении, определяется как произведение площади фактического контакта на величину напряжения среза.

Если поверхность одного из соприкасающихся тел покрыта тонкой пленкой мягкого металла, то величина напряжения среза такого соединения мала. Если при этом твердость соприкасающихся тел выше твердости покрытия, то площадь фактического касания тем меньше, чем выше их твердость. На основании таких рассуждений Ф.Боуден приходит к выводу, что сила трения тем меньше, чем меньше твердость покрытия и выше твердость соприкасающихся тел.

Эту гипотезу Ф.Боуден подкрепил опытными данными, показывая, что таким путем можно существенно снизить силу трения между телами, а следовательно, и коэффициент трения. Вместе с тем эксперименты показали, что абсолютные значения коэффициентов трения для выбранных материалов не постоянны и зависят от геометрических размеров контактирующих тел, толщины покрытия и нагрузки. При трении твердых тел с тонкими металлическими покрытиями второй закон Амонтона не соблюдается, так как с увеличением нагрузки коэффициент трения уменьшается.

В дальнейшем работы Ф.Боудена были продолжены Р.Бартоном. Им было показано, что при малых нагрузках влияние жесткости подложки на коэффициент трения отсутствует, и трение подчиняется законам Амонтона. При больших нагрузках начинает проявляться влияние жесткости подложки на коэффициент трения, который изменяется с изменением нагрузки и толщины покрытия. В настоящее время имеется много экспериментальных работ, посвященных данному вопросу. Все они в общем повторяют в той или иной степени исследования Ф.Боудена и Р.Бартона.

Ф.Боуден [1] и Р.Бартон дали качественное описание схемы взаимодействия твердых тел при трении. Однако каких-либо количественных соотношений между силой трения, нагрузкой, толщиной покрытия, а также формой, размерами и свойствами соприкасающихся тел ими не было установлено.

Б.А.Друяновым была рассмотрена иная задача, решение которой в настоящее время используется в расчетах процессов трения. В его работе дан расчет усилий, необходимых для движения жесткого индентора параллельно границе пластического полупространства на примере начального пластического течения [2]. Б.А.Друяновым дано решение задачи о движении сферического индентора по идеальному жестко-пластическому, неоднородному по свойствам полупространству. В работе дан инженерный расчет усилий, возникающих при движении сферического индентора по идеальному жестко-пластическому полупространству. В рассмотренной схеме принят ряд упрощений, тем не менее эксперименты показывают, что расчеты удовлетворительно согласуются с опытом.

В случае статического контактирования твердых тел для исследования взаимодействия микронеровностей можно использовать решения задач о вдавлении индентора в пластическое полупространство, выполненные Л.Прандтлем, Р.Хиллом, В.В.Соколовским и А.Д.Томленовым [3]. Указанные решения не позволяют построить поле скоростей, совместимое с полем напряжений. Поэтому их следует рассматривать как приближенные.

И.В.Крагельским предложен расчет коэффициента трения, учитывающий механические свойства тонких покрытий [4]. Расчетное уравнение получено при анализе напряженного состояния, возникающего при скольжении жесткой сферической микронеровности по идеальному жестко-пластическому полупространству с пленкой, имеющей толщину, несоизмеримо меньшую глубины внедрения микронеровности. Влияние пленки учитывалось касательным к поверхности индентора напряжением, действующим по границе контакта и равным прочности материала пленки на срез.

Сравнительно недавно (2008 г.) вышла в свет книга академика РАН К.В.Фролова «Современная трибология», где приведен ретроспективный анализ истории развития в XX – начале XXI в. основных направлений трибологии — науки о трении, износе и смазке машин [5].

В этой работе, а также в работах, перечисленных выше, вопросы сухого трения рассматриваются в основном в рамках теории пластической деформации и механики твердых тел.

Вопросам, связанным с учетом физических свойств контактирующих поверхностей в процессах трения, пока уделяется недостаточное внимание. Исключение составляют работы по синергетике трибологических систем (см., напр., [5]).

В настоящей работе мы обратим внимание на некоторые физические аспекты сухого трения.

Работа разрушения шероховатостей при сухом трении

В работах [6–8] в рамках термодинамического подхода для коэффициента сухого трения нами получена следующая формула:

$$k_{mp} = C \cdot T \cdot \frac{A}{\mu} \cdot \bar{N}, \quad (1)$$

где A — работа (энергия) разрушения; T — температура; μ — химический потенциал металла; \bar{N} — среднее число элементарных носителей разрушения (пропорциональное числу контактов); C — постоянная.

Из полученной нами формулы (1) следует, что коэффициент сухого трения линейно зависит от работы разрушения контактов (шероховатостей).

Работа A (Дж), затрачиваемая на разрушение контактов, пропорциональна вновь образованной поверхности частиц разрушенного продукта:

$$A = \gamma \Delta S = K_R D^2, \quad (2)$$

где γ — временное сопротивление сжатию ($\text{Н} \cdot \text{м}/\text{м}^2$); ΔS — площадь вновь образованной поверхности (м^2); K_R — коэффициент пропорциональности ($\text{Н} \cdot \text{м}/\text{м}^2$); D — характерный размер контакта (м).

Уравнение (2) соответствует гипотезе Риттингера (1867 г.) [9]. Если при разрушении контакта кубической формы энергия затрачивается в основном на деформацию объема, то в этом случае производимая работа прямо пропорциональна изменению его первоначального объема и определяется по формуле Кирпичева–Кика:

$$A = K \Delta V = K_K D^3, \quad (3)$$

где K и K_K — коэффициенты пропорциональности ($\text{Н} \cdot \text{м}/\text{м}^3$); ΔV — деформированный объем (м^3).

П.А.Ребиндер (1941г.) объединил обе гипотезы. В этом случае полная работа разрушения равна

$$A = K_R D^2 + K_K D^3. \quad (4)$$

По гипотезе Бонда (1950 г.) полная работа разрушения пропорциональна среднему геометрическому между объемом и площадью поверхности контакта:

$$A = K_B \sqrt{D^2 D^3} = K_B D^{2,5}. \quad (5)$$

Все формулы (2)–(5) различаются коэффициентами пропорциональности и показателями степени диаметра контакта. Этот показатель связан с размерностью поверхности контакта, которая в современном понимании имеет фрактальную природу.

На рисунках 1–6 показаны АСМ-изображения и фрактальные структуры исследованных нами металлических композиционных пленок на стали X12, полученные в режиме латерально-силовой микроскопии (одновременно с контактной статической АСМ). Видно, что покрытия имеют глобулярную структуру, хотя и различную.

В таблице 1 представлены характеристики фрактальной структуры исследованных покрытий.

Т а б л и ц а 1

Параметры шероховатости и статистические характеристики покрытий

Электрод	Шероховатость, R_q , нм	Дисперсия, R_q	Асимметрия, R_{sk}	Экспесс, R_{ku}	α , °	$\bar{\varphi}$, °	φ_{mf} , °	Фрактальная размерность структуры D_s
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al	13,34	18,23	0,17	7,35	322	1,49	4,5	1,89
Zn-Al	78,0	99,7	0,44	3,46	322	1,48	17,5	1,81
Mn-Fe-Cu-Al	29,89	41,42	0,15	8,97	270	1,49	3,5	1,79

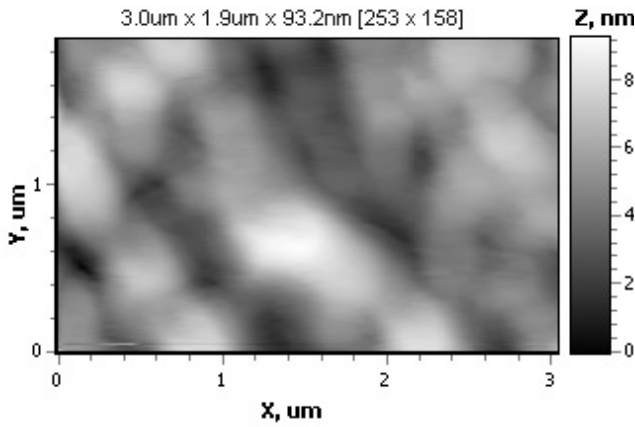


Рис. 1. ACM-изображение покрытия Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al

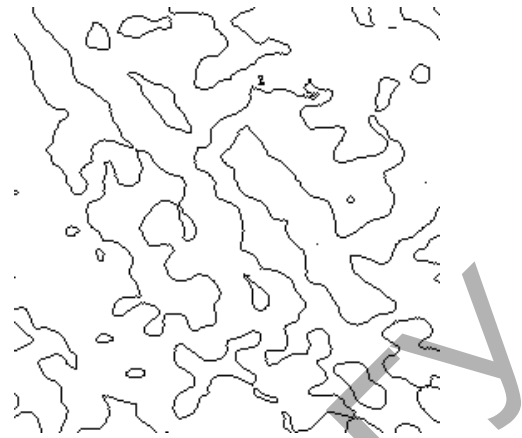


Рис. 2. Фрактальная структура покрытия Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al

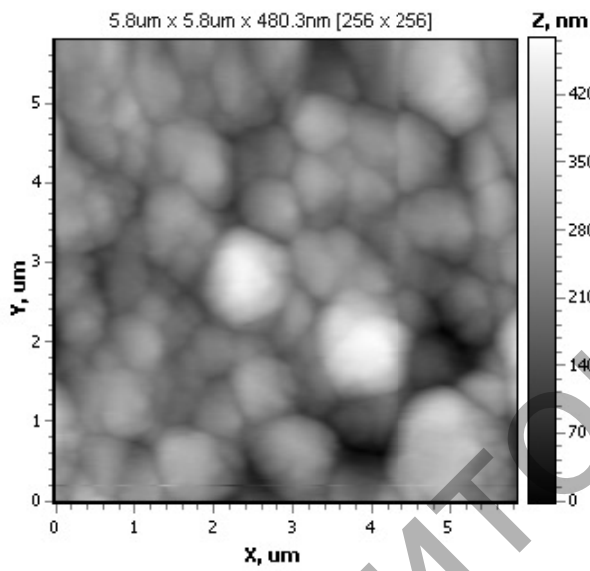


Рис. 3. ACM-изображение покрытия Zn-Al

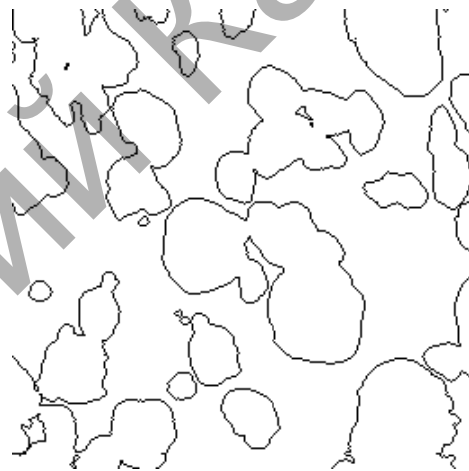


Рис. 4. Фрактальная структура покрытия Zn-Al

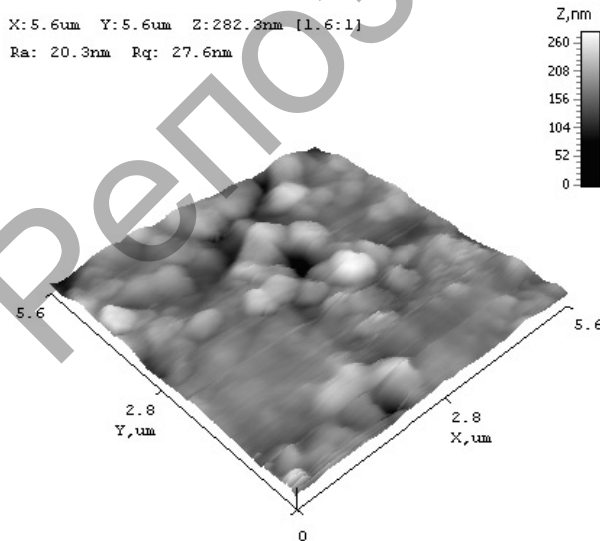


Рис. 5. ACM-изображение покрытия Mn-Fe-Cu-Al



Рис. 6. Фрактальная структура покрытия Mn-Fe-Cu-Al

Из таблицы 1 следует, что показатель в формулах (2)–(5) должен быть равен $D_s \leq 2$.
В окончательном виде полученная нами формула для коэффициента трения примет вид

$$k_{mp} = C \cdot T \cdot \frac{D^{D_s}}{\mu} \cdot \bar{N}. \quad (6)$$

Сухое трение, энергия Ферми и работа выхода электронов

Для чистых металлов химический потенциал совпадает с энергией Ферми. В таблице 2 эти значения приведены для некоторых металлов [10].

Т а б л и ц а 2

Энергия Ферми некоторых металлов

Металл	Энергия Ферми, эВ	Металл	Энергия Ферми, эВ
Медь	7,00	Цинк	9,39
Серебро	5,48	Алюминий	11,63
Золото	5,51	Свинец	9,37
Магний	7,13	Олово	10,03
Стронций	3,95	Кальций	4,68

Из уравнения (1) следует, что коэффициент сухого трения тем меньше, чем больше химический потенциал (энергия Ферми).

В таблице 3 приведены коэффициенты сухого трения для однородных пар наиболее распространенных материалов [11]. В целом корреляция между таблицами 2 и 3 наблюдается.

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты сухого трения для однородных пар наиболее распространенных материалов

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения
Алюминий	Алюминий	1,05–1,35
Кадмий	Кадмий	0,5
Хром	Хром	0,41
Медь	Медь	1,0
Графит	Графит (в вакууме)	0,5–0,8
Железо	Железо	1,0
Магний	Магний	0,6
Никель	Никель	0,7–1,1
Платина	Платина	1,2
Серебро	Серебро	1,4
Сталь	Сталь	0,8
Цинк	Цинк	0,6

Если теперь мы приведем в соприкосновение два разнородных металла, то возникнет контактная разность потенциалов. Обозначая через W_{01} и W_{02} работы выхода электронов из металла, имеем для контактной разности потенциалов:

$$V_k = \frac{1}{e}(W_{02} - W_{01}). \quad (7)$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$k_{mp} = C \cdot T \cdot \frac{A}{V_k} \cdot \bar{N}. \quad (8)$$

В таблице 4 приведены значения работы выхода электронов из некоторых металлов, которые позволяют сделать качественную оценку компоненты сухого статического трения и трения скольжения. Для антифрикционных пар необходимо (формула (8)), чтобы контактная разность потенциалов V_k была как можно больше, т.е. материал для антифрикционных пар трения нужно подбирать так, чтобы

два разнородных металла различались как можно больше работой выхода электронов. Это особенно важно при нанесении многослойных покрытий — каждый слой покрытия должен иметь соответствующую работу выхода электронов.

Т а б л и ц а 4

Работа выхода электронов из некоторых металлов

Металл	W , эВ
Алюминий	4,25
Вольфрам	4,54
Железо	4,31
Медь	4,4
Никель	4,5
Олово	4,39
Платина	5,32
Серебро	4,25
Цинк	4,54

В таблице 5 приведены значения коэффициентов сухого трения для разнородных пар наиболее распространенных материалов. Сравнение таблиц 3 и 5 показывает значительное снижение коэффициента сухого трения в случае разнородных металлов в парах трения.

Т а б л и ц а 5

Коэффициенты сухого трения для разнородных пар наиболее распространенных материалов

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения
Алюминий	Низкоуглеродистая сталь	0,61
Латунь	Сталь	0,35
Кадмий	Хром	0,41
Медь	Низкоуглеродистая сталь	0,53
Никель	Низкоуглеродистая сталь	0,64
Карбид вольфрама	Медь	0,35

В случае учета шероховатости поверхности работа выхода на исследуемой поверхности не одинакова. Дело в том, что работа выхода очень чувствительна к особенностям поверхности. Подготовка образца, неоднородное распределение адсорбатов, ориентация кристаллической решетки, наличие на поверхности ступенек, выступов, углублений или дефектов могут влиять на работу выхода, делая ее разной от точки к точке.

Представим себе металлическую поверхность, на которой есть некое пятно адсорбата (рис. 7). Пусть работа выхода адсорбата равна ϕ_A , а работа выхода рассматриваемого металла ϕ_B . Области с отличной от окружающей поверхности работой выхода сопровождаются «компенсирующим» электрическим полем. Оно выходит из пятна адсорбата, которое можно представить в виде дипольного пласта, создающего подобную конфигурацию силовых линий. При этом на образце индуцируется поверхностный заряд. Силы, возникающие между заряженной поверхностью и дипольным пластом на образце, известны как локальные электростатические силы.

Вычислить локальные электростатические силы довольно сложно, во-первых, из-за нетривиальной природы электрического поля, связанного с дипольным пластом, а во-вторых, из-за того, что распределение зарядов изображения, наведенных на соседних телах, сильно зависит от геометрии этих тел.

В случае композиционных материалов уравнение (1) нужно заменить уравнением

$$k_{mp} = C \cdot T \cdot \frac{A}{\Delta G^0} \cdot \bar{N}. \tag{9}$$

Здесь ΔG^0 — энергия Гиббса образования сплава. Формула (9) показывает, что для уменьшения коэффициента трения нужны сплавы с большей энергией Гиббса.

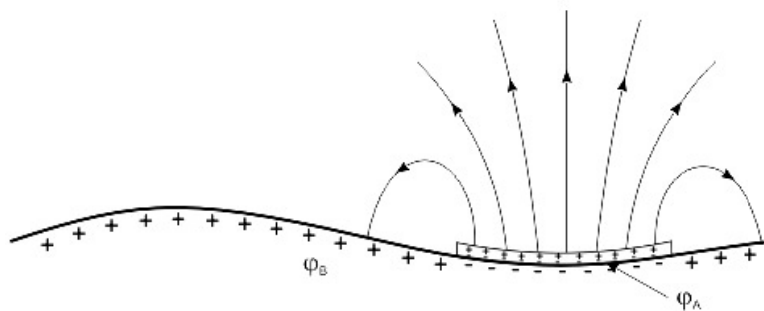


Рис. 7. Пятно адсорбата с работой выхода ϕ_A на металлической поверхности с работой выхода ϕ_B

В простейшем случае энергия Гиббса многокомпонентной системы равна

$$G^0 = \sum_i X_i G_i^0 = X_1 G_1^0 + \dots + X_n G_n^0, \tag{10}$$

где X_i — мольная доля компонент сплава.

В таблице 5 приведены энергии Гиббса некоторых компонент сплава [12].

Т а б л и ц а 5

Стандартные энергии Гиббса $\Delta_{ij}G_{298}^0$ фазовых превращений некоторых компонент сплавов

Элемент	Фазовый переход	$\Delta_{ij}G_{298}^0$, Дж/моль
Fe	О.ц.к. (A2) = Г.ц.к. (A1)	4557,2
Cr	О.ц.к. (A2) = Г.ц.к. (A1)	10647,0
Ni	Г.ц.к. (A1) = О.ц.к. (A2)	4180,5
Ti	Г.п.у. (A3) = О.ц.к. (A2)	5473,1
	Г.п.у. (A3) = Г.ц.к. (A1)	3347,1
Mn	Кубическая (A12) = Г.ц.к. (A1)	1277,6
Si	Алмаз (A4) = Г.ц.к. (A1)	38071,3
	Алмаз (A4) = О.ц.к. (A2)	38527,0
Cu	Г.ц.к. (A1) = О.ц.к. (A2)	4234,6
	Г.ц.к. (A1) = Г.п.у. (A3)	6347,2

Из полученной нами формулы (9) и таблицы 5 следует, что для уменьшения коэффициента сухого трения для сплавов титана (этот материал используется в космической технике) можно добавлять хром, медь, кремний.

Влияние внешнего давления на коэффициент сухого трения

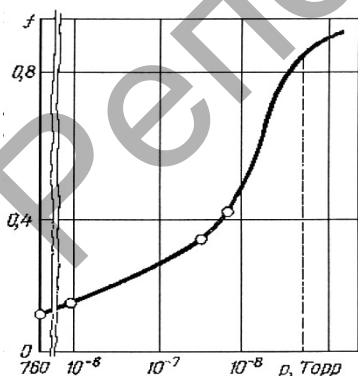


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения алмаза по алмазу в вакууме от давления

Как в теоретическом, так и в экспериментальном плане этот вопрос изучен недостаточно. В полученной нами формуле (9) энергия Гиббса $G^0 = H - TS + PV$, где H — энтальпия; S — энтропия; T — температура; P — давление; V — объем.

Тогда из (9) мы имеем следующую зависимость коэффициента трения от давления:

$$k_{mp} = \frac{a}{b + cP}, \tag{11}$$

где a, b, c — постоянные.

Из (11) следует, что коэффициент трения увеличивается с уменьшением давления. Это приводит к нежелательным эффектам в условиях космического вакуума. На рисунке 8 приведена подобная зависимость из работы [13]. Зависимость очень хорошо описывается нашей формулой (11).

Заключение

Приведенные выше примеры показывают, что для адекватного описания механизма сухого трения теории пластичности недостаточно. Необходимо учитывать большой спектр как механических, так и других физических свойств поверхности, включая ее фрактальную размерность.

References

1. *Bouden F.P., Teibor D.* Friction and greasing of firm bodies. — M.: Mechanical engineering, 1968. — 543 p.
2. *Drujanov B.A., Nepershin R.I.* Theory of technological plasticity. — M.: Mechanical engineering, 1990. — 272 p.
3. *Tomlenov A.D.* Theory of plastic deformation of metals. — M.: Metallurgy, 1972. — 408 p.
4. *Kragelskiy I.V.* Friction and deterioration. — M.: Mechanical engineering, 1968. — 480 p.
5. *Frolov K.V.* Modern tribology: Results and prospects. — M.: Science, 2008. — 480 p.
6. *Jurov V.M., Guchenko S.A., Ibraev N.H.* Superficial a tension of metals in liquid and firm phases // The Scientific life. — M.: Science, 2009. — № 5. — P. 18–21.
7. *Jurov V.M., Guchenko S.A., Ibraev N.H.* Definition of factor of a sliding friction // The International magazine applied and basic researches. — 2010. — № 8. — P. 148.
8. *Jurov V.M.* Temperature dependence of factor of friction // The International magazine applied and basic researches. — 2010. — № 8. — P. 151–152.
9. *Parton V.Z.* Mechanics of destruction: from the theory to practice. — M.: Science, 1990. — 240 p.
10. *Kittel C.V.* Introduction in physics of a firm body. — M.: Science, 1978. — 792 p.
11. *Kragelskiy I.V., Vinogradova I.E.* Factor of friction. — M.: MashGiz, 1962. — 220 p.
12. *Zinovev V.E.* Thermal of property of metals at high temperatures. The directory. — M.: Metallurgy, 1989. — 364 p.
13. *Nusinov M.L.* Space vacuum and reliability of space techniques // New in a life, a science, techniques. — 1986. — № 6. — 59 p.