

05;12

О характеристиках минимального изнашивания при граничном трении твердых тел

© Ю.П. Козырев, Б.М. Гинзбург

Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 25 апреля 1996 г. В окончательной редакции 15 апреля 1997 г.)

Для характеристики граничного трения твердых тел предложен новый параметр Q — вероятность того, что любое данное пятно касания превратится в частицы износа при сдвиге фактической площади контакта на средний диаметр пятна касания. Предложена методика феноменологической регистрации оптимальных режимов граничного трения, характеризуемых минимальной интенсивностью изнашивания материала образца и соответствующей величиной $Q = Q^{opt}$. Определена величина Q^{opt} ($\approx 2 \cdot 10^{-10}$) для одного из наиболее антифрикционных материалов — баббита. При наличии данных о линейной интенсивности изнашивания I_h , контактном давлении p_n и твердости H можно вычислить Q для данных условий испытаний. Отклонения Q от значений Q^{opt} (для данного материала) могут служить критерием приближенности достигнутой структуры поверхности к оптимальной.

Среди различных механизмов трения принято различать три основных: сухое, граничное и жидкостное. При сухом трении взаимодействие контртел наиболее сильно, что часто приводит к схватыванию и ограничивает использование режимов сухого трения на практике. Для процессов сухого трения характерно интенсивное изнашивание. При жидкостном трении контртела разделены слоем жидкой смазки и не контактируют друг с другом, что приводит к практическому отсутствию износа. Только в процессе граничного трения, промежуточного между жидкостным и сухим можно удобно наблюдать и изучать характерные для различных материалов процессы структурной приспособляемости контртел [1–3]. В технике подобные процессы получили название приработки. В результате этих процессов происходят такие изменения структуры поверхностей контактирующих тел на макро- и микроуровнях, которые приводят к некоторой минимальной интенсивности изнашивания для данных условий трения.

При определении интенсивности изнашивания материалов обычно условия испытаний и материалы контртел подбирают таким образом, что износом одного из контртел можно пренебречь, а второе контртело, износ которого измеряется, является испытываемым образцом. Возникает вопрос, существует ли некая характеристика материала, указывающая на оптимальный режим граничного трения (и, по-видимому, на оптимальную структуру поверхности образца) и соответственно минимальную интенсивность изнашивания материала образца для различных условий его испытаний (давления, вида смазки и т.д.). Возникает и второй вопрос, возможно ли с помощью этой величины характеризовать изнашиваемость любых материалов и ранжировать их, сравнивая между собой соответствующие величины.

Цель настоящей работы — рассмотреть возможность, оценивать свойства материалов с позиций оптимизации структуры поверхности ведущей к минимальной интен-

сивности изнашивания в процессе граничного трения скольжения и в какой-то мере ответить на указанные вопросы.

Величина линейной интенсивности изнашивания I_h , часто приводимая для характеристики износостойкости [4], зависит от условий испытаний и в большей степени характеризует износостойкость деталей машин и механизмов из определенных материалов, нежели износостойкость самих материалов. Несколько лучшей в рассматриваемом аспекте является величина так называемого фактора износа Φ [5], определяемого из соотношения $\Phi = I_h/p_n$, где p_n — номинальное давление на контакте, однако и эта величина неудовлетворительна, так как может быть совершенно различной при разных внешних условиях и на разных этапах процесса изнашивания, а также не учитывает различную износостойкость материалов, обладающих различной прочностью или твердостью. Образцы из более твердых материалов могут обладать повышенной износостойкостью по сравнению с более мягкими материалами, но это совсем не означает, что они работают в оптимальных условиях, при которых их износостойкость (обратно пропорциональная интенсивности изнашивания или фактору износа) была бы еще выше.

Как было установлено в работах Арчарда [6], для сухого трения скольжения выполняется соотношение

$$I_h = k p_n, \quad (1)$$

где k — постоянный коэффициент.

В литературе неоднократно сообщалось, что в некотором интервале изменения давлений на контакте величина I_h является линейной функцией p_n не только для сухого, но и для других видов трения. Постоянство k в определенном интервале давлений означает неизменность механизма изнашивания в этом интервале. С другой стороны, в пионерских исследованиях трения скольжения неконформных контртел в условиях смазывания [7]

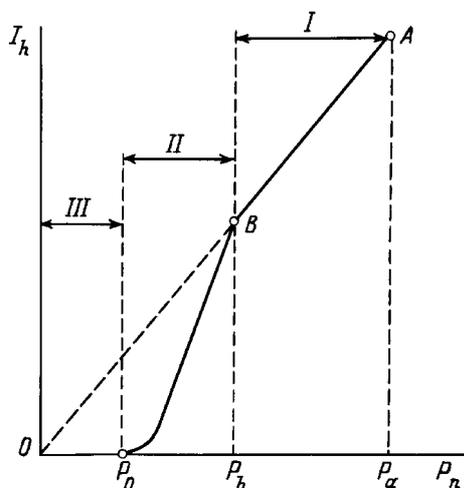


Рис. 1. Схема зависимости интенсивности линейного изнашивания от давления в условиях смазывания согласно [7].

при широкой вариации p_n , были получены результаты, согласно которым в общем случае трения со смазкой зависимость $I_h = f(p_n)$ носит более сложный характер (рис. 1): на участке I ($p_b < p_n < p_a$) наблюдается интенсивное изнашивание, на участке II ($p_0 < p_n < p_b$) происходит его резкий спад, а на участке III ($p_n < p_0$) износ практически отсутствует.

К сожалению, в литературе крайне мало систематических исследований граничного трения контртел одной и той же природы при широкой вариации внешних условий. Как показывает работа [8], а также обработанные нами данные работы [7] (см. ниже), на участке III наблюдается (хотя и малый) износ. Для иллюстрации воспользуемся результатами упомянутой работы [7], редкой по охвату экспериментальных условий исследования одних и тех же материалов. В этих экспериментах вращающийся цилиндрический ролик из стали Ст-45 контактировал вдоль образующей с неподвижным плоским образцом из баббита 83 (83% Sn, 11% Sb, 6% Cu). Неконформность контртел приводила к постоянно меняющейся площади контакта и позволила получить значения I_h для баббита в широком интервале давлений.

По табличным данным, приведенным в работе [7], нами были построены зависимости $I_h(p_n)$. На двух таких зависимостях (рис. 2, кривые 1, 2) при самых малых исследованных значениях p_n наблюдается излом соответствующий переходу к режиму изнашивания с характерной направленностью зависимости $I_h(p_n)$ к началу координат. Отметим, что для охвата всех экспериментальных данных зависимости $I_h(p_n)$ на рис. 2 приведены в логарифмических координатах. В обычных координатах прямолинейные участки типа III, идущие в начало координат, выглядят более протяженными. Будем предполагать, что именно участки типа III характеризуют приближение структуры поверхности к оптимальной в данных условиях испытаний. Это предположение под-

тверждается тем обстоятельством, что указанные участки типа III на обеих экспериментальных кривых лежат на одной прямой (прямая 4 на рис. 2) и фактически являются продолжением друг друга.

Обработка результатов еще одной серии испытаний тех же материалов дала кривую 3 на рис. 2. Участок типа III в этом случае не наблюдается, по-видимому, по той причине, что не были получены еще более малые давления (длительность испытаний при этом уже достигала 12 суток!). Однако крайние точки кривой 3, соответствующие самым малым из достигнутых значений I_h , хорошо ложатся на ту же прямую 4 (рис. 2). Таким образом, прямая 4 на рис. 2 описывается зависимостью типа (1)

$$I_h^{\text{opt}} = K^{\text{opt}} p_n. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности K^{opt} характеризует минимальную из наблюдаемых интенсивность изнашивания для всех трех экспериментальных кривых на рис. 2, полученных при разных начальных нагрузках и разных типах смазки. Как указывалось выше, постоянство коэффициента пропорциональности в случаях, описываемых функциями типа (1), означает неизменность механизма изнашивания. Следовательно, можно полагать, что вне зависимости от нагрузки и типа смазки при прочих постоянных условиях трения механизм изнашивания одинаков для случаев, описываемых кривыми изнашивания на рис. 2 (по крайней мере кривыми 1, 2) при минимальных значениях внешних давлений. Поскольку изнашивание при этом минимально, то будем считать,

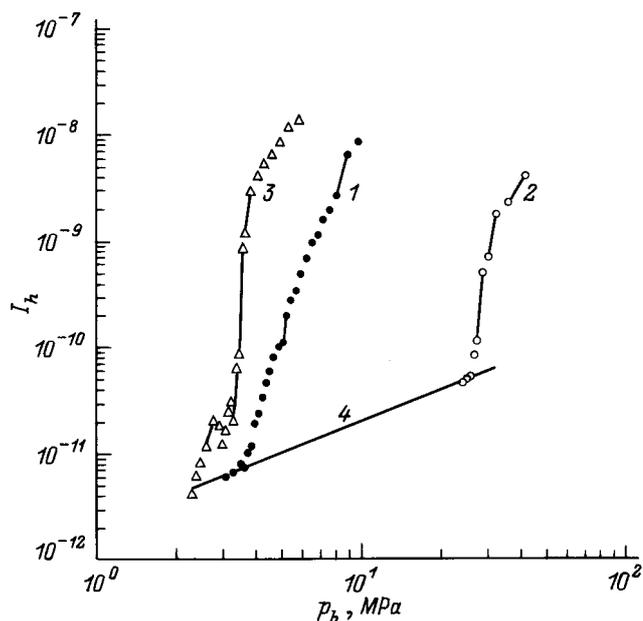


Рис. 2. Зависимости интенсивности линейного изнашивания от давления, построенные на основании данных, приведенных в работе [7]. Материал — баббит Б-83, вращающийся ролик — сталь Ст-45. Скорость скольжения 3 м/с. Нагрузка, N : 1, 3 — 100; 2 — 300. Смазка; 1, 2 — автол, 3 — керосин; 4 — зависимость $I_h = k p_n$.

что соответствующая структура поверхности трения баббита оптимальна для условий граничного трения. Эта структура не зависит ни от приложенной нагрузки, ни от типа смазки. Ее износ описывается зависимостью (2) и характеризуется линейной интенсивностью изнашивания при оптимальном граничном трении I_h^{opt} .

Попытаемся раскрыть физический смысл коэффициента K^{opt} в выражении (2). Для дальнейших математических выкладок примем, согласно [6], что объем частицы износа V_d пропорционален площади пятна касания. Тогда имеем

$$V_d \approx \Delta h d^2, \quad (3)$$

где d — диаметр пятна касания, Δh — высота частицы износа.

Обозначим через α количество пятен касания, превращающихся в частицы износа, отделяющиеся от изнашиваемой поверхности при сдвиге фактической площади контакта на средний диаметр пятна касания. Тогда вероятность того, что любое данное пятно касания превратится в частицы износа (в принципе может образоваться несколько частиц износа из одного пятна касания) равна

$$Q = \alpha/n, \quad (4)$$

где $n = A_r/d^2$ — общее число пятен касания, составляющих фактическую площадь контакта A_r .

Объединяя выражения (3) и (4), находим удельный объемный износ при сдвиге на диаметр пятна касания

$$V_e = Qn\Delta h d^2. \quad (5)$$

Известно, что величина удельной интенсивности изнашивания определяется соотношением [4]

$$i_h = V_e/A_r d. \quad (6)$$

Подставив формулу (5) в выражение (6), получим

$$i_h = Q \frac{\Delta h}{d}. \quad (7)$$

С другой стороны, в стационарных режимах изнашивания величина интенсивности линейного изнашивания I_h связана с удельной интенсивностью изнашивания i_h соотношением [4]

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_n}, \quad (8)$$

где A_n — номинальная площадь контакта.

Если, согласно [9], принять, что

$$A_r \approx \frac{3F_n}{H}, \quad (9)$$

где F_n — нормальная нагрузка, H — твердость материала по Бринеллю, то с учетом выражений (6) и (8) получаем

$$I_h \approx \frac{3\Delta h Q}{dH} p_n. \quad (10)$$

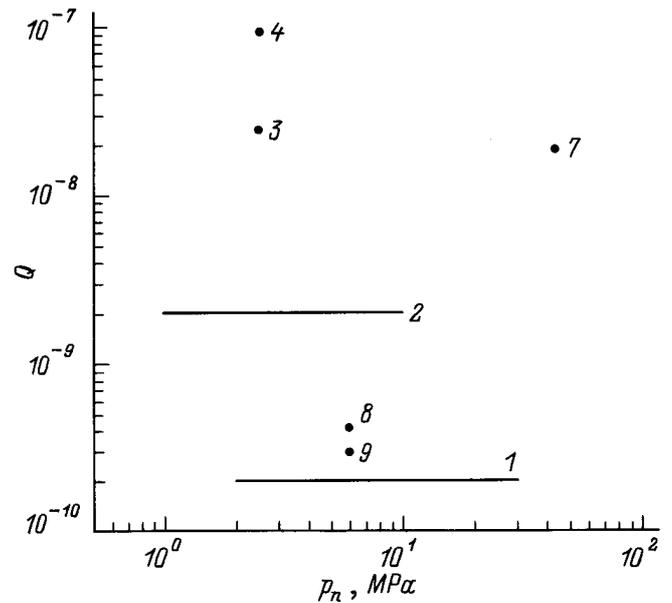


Рис. 3. Зависимости вероятности образования частиц износа Q от давления p_n для износостойких антифрикционных материалов. Цифры у кривых и экспериментальных точек соответствуют порядковому номеру материала в таблице.

В выражении (10) имеем отношение $\Delta h/d \leq 1$; равенство единице соответствует случаю частиц износа комкообразной формы, что наблюдается довольно часто при изнашивании металлов. При изнашивании полимерных материалов частицы износа могут иметь пластинчатую форму, тогда отношение $\Delta h/d$ существенно меньше 1.

Таким образом, сравнение выражений (2) и (10) позволяет выразить коэффициент K^{opt} через ряд физических величин, имеющих вполне определенный смысл — макроскопическую характеристику процесса изнашивания I_h , микрохарактеристики частиц износа Δh и d и коэффициент Q , характеризующий стохастический характер процесса.

Естественно полагать, что при оптимальном режиме граничного трения вероятность образования частиц износа из данного пятна касания минимальна. Обозначим ее как Q^{opt} . Для определения величины Q^{opt} в случае баббитов воспользуемся графиками, приведенными на рис. 2. По кривой 4 (рис. 2) был рассчитан коэффициент K^{opt} , а из него по формуле (10), принимая $\Delta h = d$ и используя известные данные по твердости баббита, рассчитали величину $Q^{\text{opt}} = K^{\text{opt}}H/3$. Эта величина, показанная на рис. 3 в виде горизонтальной линии, параллельной оси абсцисс, может служить своеобразным репером, характеризующим минимальное изнашивание для таких апробированных антифрикционных материалов, как баббиты.

Сопоставим с этим значением величины Q , рассчитанные по литературным данным для других материалов. Для этого используем формулу (10) в тех случаях, когда для испытанных материалов с высокой износостойкостью

Характерные значения вероятности Q для износостойких антифрикционных материалов

№ кривой	Пара трения	Твердость по Бринеллю МПа	Давление, МПа	Смазка	Вероятность, $Q, 10^{-10}$	Источник информации
1	Баббит Б-83–сталь Ст-45	300	2–30	Автол-10, керосин	2	[7]
2	ФГМ (фторопласт-4 + графит + MoS_2)–сталь 3Х13	60	1–10	Без смазки	20	[10]
3	Бронза БрОЦС5-55–сталь Ст-45	600	2.5	Индустриальное масло	250	[4]
4	Сталь Ст-45–бронза БрОЦС5-5-5	2300	2.5	” ”	950	[4]
5	Бронза БрОФ-10-1–сталь 20Х	900	–	И-30	99	[11]
6	Бронза БрОЦС-5-5-5–сталь ШХ-15	600	–	И-30	100	[11]
7	Покрытие из карбида титана на стали Ст-20–стали Ст-45	$3 \cdot 10^4$ *	43	И-40А	185	[12]
8	Чугун–луженое кольцо	3000	6	Моторное масло	3	[4]
9	Чугун–хромированное кольцо	3000	6	” ”	4.2	[4]

* Величина микротвердости. Величины Q определены для материалов, которые указаны первыми в графе "Пара трения".

стойкостью в литературе приводятся значения I_h , p_n и твердости. Некоторые данные для таких материалов и деталей машин приведены в таблице, а результаты расчетов нанесены на тот же рис. 3. Во всех случаях рассчитанные значения Q по крайней мере не меньше, чем Q^{opt} для баббитов, а в случае чугунных гильз двигателей с высокой износостойкостью близки к Q^{opt} для баббитов.

Последнее обстоятельство позволяет предположить, что и для других материалов минимальное изнашивание характеризуется примерно теми же значениями Q^{opt} .

Значению Q^{opt} для баббитов можно придать пока смысл реперной характеристики, относительно которой можно ранжировать другие материалы. С другой стороны, если будут определены значения Q^{opt} для других материалов, то всегда отклонения значений Q , рассчитанных для данных условий испытаний, от значений Q^{opt} для данного материала могут служить оценкой того, насколько достигнутая структура поверхности далека от оптимальной.

Таким образом, в данной работе в качестве реперного параметра, характеризующего минимальное изнашивание материалов, предлагается использовать величину вероятности образования частиц износа Q^{opt} в условиях граничного трения в оптимальном установившемся режиме.

Предполагается, что эта величина мало зависит от природы контртел, контактирующих при трении скольжения, и имеет величину порядка $\sim 10^{-10}$.

Выводы

1. Анализ литературы показывает, что измерения линейной интенсивности изнашивания I_h в широком интервале изменений контактных давлений p_n (например, путем использования неконформных контртел), а также

при вариации начальных нагрузок и типов смазки позволяют выйти на режим трения, характеризуемый минимальным изнашиванием в данных условиях испытаний. Для описания этого режима справедливо соотношение типа $I_h^{opt} = K^{opt} p_n$ вне зависимости от начальной нагрузки или типа смазки. По значениям K^{opt} рассчитывается вероятность образования частиц износа Q^{opt} из пятна касания в указанном режиме (при сдвиге фактической площади контакта на средний диаметр пятна касания), которую предлагается использовать в качестве реперного параметра, характеризующего минимальное изнашивание данного материала и оптимальную структуру его поверхности.

2. Определена величина Q^{opt} для одного из наиболее антифрикционных материалов — баббита, она составляет $2 \cdot 10^{-10}$. Предполагается, что эта величина мало зависит от природы контртел, контактирующих при трении скольжения, и имеет величину порядка $\sim 10^{-10}$.

3. В любых режимах трения при наличии данных о линейной интенсивности изнашивания I_h , контактном давлении p_n и твердости H можно вычислить вероятность Q образования частиц износа из пятна касания. Отклонения значений Q , рассчитанных для данных условий испытаний, от значений Q^{opt} для данного материала могут служить оценкой того, насколько достигнутая структура поверхности далека от оптимальной.

4. К настоящему времени величина $Q^{opt} = 2 \cdot 10^{-10}$, полученная для баббита, является наименьшей по сравнению со значениями Q , рассчитанными для других материалов по литературным данным.

Работа выполнена в рамках Российской научно-технической программы "Фуллерены и атомные кластеры" (проект "Трибол").

Список литературы

- [1] *Klamecki B.E.* // *Wear*. 1980. Vol. 58. N 3. P. 325–330.
- [2] *Костецкий Б.И.* // ДАН УССР. 1984. Сер. А. № 4. С. 52–57.
- [3] *Костецкий Б.И.* // Трение и износ. 1993. Т. 14. № 4. С. 773–783.
- [4] *Крагельский И.В., Добычин М.М., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 440 с.
- [5] *Комбалов В.С.* Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. М.: Наука, 1983. 324 с.
- [6] *Archard J.E.* // *J. Appl. Phys.* 1953. Vol. 24. N 8. P. 981–988.
- [7] *Хрущов М.М.* Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 252 с.
- [8] *Марков Д.П.* Трение и износ. 1993. Т. 14. № 3. С. 601–605.
- [9] *Bowden F.P., Tabor D.* *The Friction and Lubrication of Solid.* Oxford: Clarendon Press, 1954. 450 p.
- [10] *Комбалов В.С.* // Трение и износ. 1981. Т. 2. № 1. С. 134–143.
- [11] *Алисин В.В.* // Межотраслевые вопросы науки и техники. Вып. 15. М.: ГОСНИТИ, 1980.
- [12] *Булатов В.П., Гинзбург Б.М., Козырев Ю.П.* и др. // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 6. С. 1009–1013.