

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 620.178.1

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ДОПУСТИМОГО ИЗНОСА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

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

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2022

Настоящей статьей заканчивается серия публикаций результатов авторских исследований, посвященных прогнозированию износа деталей с градиентом твердости по глубине материала, возникшим в результате механической обработки или применения упрочняющих технологий. Для описания изменения твердости материала в зависимости от расстояния до поверхности трения получена более универсальная аналитическая зависимость, чем в предыдущих работах авторов. Предложенные ранее формулы являются частными случаями этой более общей зависимости. На основании аналитической зависимости, описывающей изменение твердости по глубине материала, известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда для оценки величины износа распространено на случай изнашивания поверхности с градиентом твердости по глубине. Кроме того, получена формула для прогнозирования ресурса фрикционного соединения по критерию допустимого износа. Приведен конкретный пример оценки ресурса в виде значения пути трения, на котором достигается предельная величина линейного износа. Показано, что игнорирование градиента твердости при оценке ресурса трибосопряжения может привести к существенной погрешности.

Ключевые слова: трение, изнашивание, упрочнение поверхности, градиент твердости, ресурс, прогнозирование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-5-17

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование ресурса на стадии проектирования, а также оценка остаточного ресурса на стадии эксплуатации – необходимые элементы обеспечения надежности любого технического устройства. Одним из критериев исчерпания ресурса технического изделия или отдельного узла служит величина предельного износа. Последний рассматривается как индикатор предельного состояния объекта [1, 2]. В связи с этим возникает необходимость разработки методики расчета характеристик изнашивания данного конкретного устройства на основе соответствующих аналитических зависимостей, описывающих процесс изнашивания и его результат. Для фрикционных соединений, являющихся составной частью большинства современных машин, механизмов и приборов, это означает наличие аналитических зависимостей для расчета таких характеристик, как интенсивность или скорость изнашивания, в функции ключевых параметров данного соединения и условий его эксплуатации.

Разработка указанных зависимостей осложняется случайным характером процесса изнашивания, который определяется достаточно большим числом

трудноконтролируемых параметров (до нескольких десятков [3]). Учесть их все в единой модели процесса изнашивания и описать универсальной аналитической зависимостью практически невозможно. Авторы обзора [4], проанализировав сотни имеющихся в трибологической литературе соответствующих аналитических зависимостей, пришли к выводу, что не существует универсальных и пригодных для практического применения уравнений, позволяющих предсказать результат процесса изнашивания. С момента публикации этой работы ситуация не изменилась.

УРАВНЕНИЕ АРЧАРДА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ

К числу наиболее известных и часто используемых аналитических зависимостей, позволяющих прогнозировать величину износа трущихся поверхностей, относится уравнение Арчарда (или Хольма – Арчарда) [3, 5–8], которое обычно записывают в виде

$$I_V = K \frac{N}{H} \quad (1)$$

или в виде

$$I_h = K \frac{p_n}{H}, \quad (2)$$

где $I_V = \frac{V}{L}$ и $I_h = \frac{h}{L}$ – объемная и линейная интенсивности изнашивания; V и h – объем и толщина слоя изношенного материала; L – путь трения; N – нормальная нагрузка на контакт; H – твердость поверхностных слоев материала трущихся деталей; K – эмпирический коэффициент, обычно называемый коэффициентом изнашивания; p_n – номинальное контактное давление.

Несмотря на простой вид, уравнения (1) и (2) отражают основные тенденции, установленные в ходе многочисленных экспериментов:

более твердая поверхность трущихся деталей изнашивается меньше, чем менее твердая [9];

износ пропорционален пути трения [5] (прямая пропорциональность не единственный возможный вариант);

с ростом нормальной нагрузки износ трущихся деталей увеличивается [5].

Приведенные утверждения – это именно тенденции, и уравнения (1) и (2) описывают их весьма приблизительно, только при неизменном в процессе эксплуатации механизме изнашивания и в определенном диапазоне изменения параметров, входящих в эти уравнения. Эксперименты показывают, что зависимости интенсивности изнашивания от параметров, входящих в уравнения (1) и (2), часто нелинейные и носят степенной характер. Тем не менее уравнение (1) не потеряло своей актуальности [10].

Здесь уместно провести аналогию с известным законом трения Амонтона

$$F_{\text{тр}} = fN,$$

где $F_{\text{тр}}$ и N – силы трения и нормального давления соответственно; f – коэффициент трения.

Как и уравнение Арчарда, закон Амонтона очень приближителен (хотя бы вследствие непостоянства коэффициента трения). Тем не менее он широко используется в конструктивных расчетах различных технических устройств [11]. Как и значения коэффициента изнашивания K , значения коэффициента трения f определяются экспериментально или принимаются на основании справочных данных в зависимости от материала трущихся деталей и условий трения.

Уравнения (1) и (2) имеют в основном эмпирическую (или полуэмпирическую) природу. Тем не менее в обоснование их можно привести аргументы фундаментального физического характера [5, 6]:

1. Очевидно, что объем изношенного материала есть результат процессов разрушения поверхностных слоев трущихся тел, что требует определенных затрат энергии. В связи с этим логично предположить, что изношенный объем пропорционален работе сил трения $V \propto F_{\text{тр}}L = fNL$. Отсюда вытекает пропорциональность объемной интенсивности изнашивания величине нормальной нагрузки (см. уравнение (1)).

2. Твердость в уравнениях (1) и (2) выступает, прежде всего, в качестве верхней оценки величины фактического контактного давления p_r . При пластической деформации неровностей шероховатости контактирующих поверхностей $p_r = H$, при упругой деформации p_r меньше величины H и стремится к последней с ростом нагрузки. Если предположить, что образование частиц износа происходит на площадках фактического контакта неровностей шероховатости трущихся поверхностей, то можно считать объем изношенного материала пропорциональным фактической площади контакта $A_r = \frac{N}{p_r}$, из чего следует, что $V \propto \frac{N}{p_r}$. Заменяя величину p_r ее верхней оценкой H , получаем фактически уравнение (1). Кроме того, твердость характеризует прочностные свойства материала трущихся деталей (такие, например, как предел текучести и предел прочности).

В последнее время для обоснования уравнения Арчарда привлекаются современные методы исследования. Например, в обзорной работе [12] описаны результаты численного моделирования процесса формирования частиц износа при адгезионном изнашивании. На основе модельного потенциала парного взаимодействия атомов и модели контактного взаимодействия неровностей шероховатости дается обоснование физического смысла коэффициента изнашивания K в уравнении Арчарда. Численное моделирование для объяснения механизма образования частиц износа при адгезионном изнашивании используют также авторы работы [13]. Они приходят к выводу, к которому многие авторы приходили и ранее: линейная зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки является частным случаем более общей степенной зависимости с показателем степени, большим единицы.

Наконец, уравнение (1) можно обосновать простым анализом размерностей [5]. Объемная интенсивность изнашивания I_V имеет размерность площади (т.е. квадрата длины), такую же размерность имеет отношение N/H . При пластическом контакте это отношение буквально соответствует площади фактического контакта. Тогда безразмерный коэффициент K выражает соотношение указанных площадей (или, иными словами, вероятность образования частиц износа).

Многие приводимые в литературе более сложные аналитические зависимости для прогнозирования результатов изнашивания также можно представить в виде выражения (1). Например, для расчета интенсивности усталостного изнашивания известна формула [7, 14]

$$I_h = \frac{k_y}{n_{ц}} \sqrt{\frac{\delta}{r}} \cdot \frac{p_n}{p_r}, \quad (3)$$

где k_y – коэффициент порядка 0,1, характеризующий распределение неровностей шероховатости по высоте; $n_{ц}$ – число циклов нагружения, приводящее к усталостному разрушению материала контактирующих деталей; δ – контактная деформация (сближение контактирующих поверхностей); r – средний радиус кривизны вершин выступов шероховатости.

Для стационарного процесса изнашивания величины k_y и $\sqrt{\frac{\delta}{r}}$ можно считать постоянными, характерными для данной фрикционной пары в данных условиях эксплуатации. Тогда, обозначая $\frac{k_y}{n_{ц}} \sqrt{\frac{\delta}{r}} = K$ и принимая $p_r = H$, приводим уравнение (3) к виду (2). Аналогично, как показал автор работы [15], можно привести к виду (1) уравнения, описывающие все наиболее распространенные виды изнашивания.

На основании вышеизложенного мы полагаем, что уравнение Арчарда, несмотря на хорошо известные недостатки, может служить аналитической основой для прогнозирования ресурса фрикционного соединения. Специфику преобладающего в данной фрикционной паре механизма изнашивания отражает коэффициент изнашивания K . Исчерпывающие рекомендации по его экспериментальному определению даны в работе [2], а ориентировочные значения легко найти в литературе, например в книгах [5, 16], где коэффициент K приводится как функция материала трущихся деталей, или в статье [17], где он приводится как функция условий трения.

Используя уравнения (1) или (2) для прогнозирования величины износа (при заданной длительности эксплуатации) или ресурса (при заданной величине допустимого износа), необходимо учитывать важное обстоятельство. В настоящее время практически во всех фрикционных соединениях рабочие поверхности подвергаются упрочняющей обработке: химико-термической, обработке концентрированным потоком энергии, нанесению износостойких покрытий. В результате в материале деталей фрикционной пары возникает градиент твердости по координате, направленной от рабочей поверхности вглубь материала детали (для краткости – по глубине), и этот градиент не учитывается в уравнениях (1) и (2). И даже если специальная упрочняющая технология не применяется, поверхностные слои материала упрочняются в результате технологической обработки детали. Но возможен и прямо противоположный эффект: разупрочнение поверхностей, т.е. возрастание твердости с глубиной. Положительный градиент твердости может быть результатом проявления так называемого эффекта Ребиндера (эффекта адсорбционного снижения прочности).

Цель данной работы – распространить уравнения (1) и (2) на случай изнашивания деталей с градиентом твердости по глубине, возникшим в результате механической обработки детали или в результате применения специальной упрочняющей обработки.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО ГЛУБИНЕ МАТЕРИАЛА И ИХ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Типичный вид зависимостей твердости материала деталей фрикционных соединений от глубины (расстояния от рабочей поверхности) приведен на рис. 1. Зависимости на рис. 1а в основном характерны деталям после механической обработки. При этом поверхностные слои, как отмечалось выше, могут быть не только более твердые, чем материал в объеме (линия 1), но и менее твердые (линия 2). Для поверхностей с гальваническим покрытием или покрытием, нанесенным иным способом, характерны зависимости, приведенные на рис. 1б. Наличие переходной зоны 2 может быть обусловлено взаимной диффузией материалов покрытия и подложки. Аналогичные зависимости могут наблюдаться для поверхностей после лазерной или электронно-лучевой обработки. Некоторые примеры, подтверждающие сказанное, приведены на рис. 2.

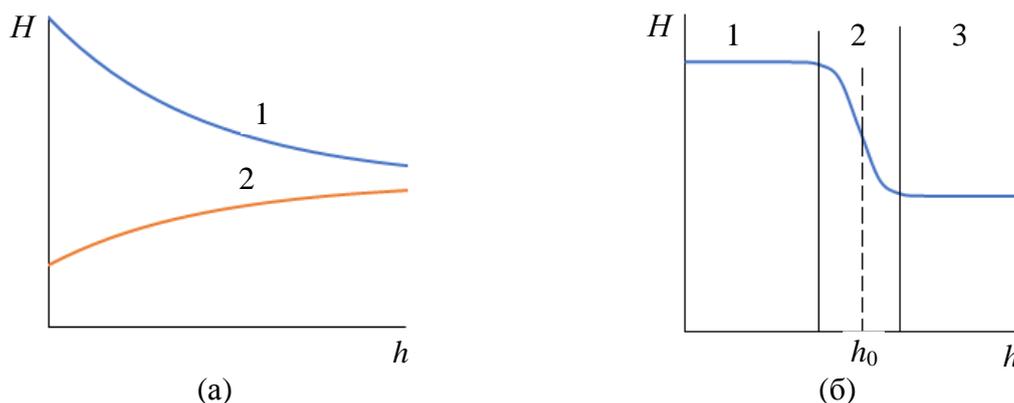


Рис. 1. Зависимость твердости материала детали H от глубины h при различных технологиях обработки поверхности: монотонная (линия 1 – упрочнение; 2 – разупрочнение поверхностных слоев) (а); немонотонная (зона 1 – упрочняющее покрытие; 2 – переходная зона; 3 – неупрочненный материал) (б)

Для зависимостей, характер которых соответствует рис. 1а, в работе [18] предложено описывающее их аналитическое выражение вида

$$H = H_0 + H_m \exp\left(-\frac{h}{h_m}\right), \quad (4)$$

где H_0 – твердость материала в объеме (на большом расстоянии от поверхности); h – глубина слоя материала (расстояние от поверхности); H_m и h_m – эмпирические константы; $H_0 + H_m$ – твердость при $h = 0$; h_m характеризует быстроту изменения твердости с глубиной.

Для зависимостей вида 1 (см. рис. 1а) $H_m > 0$, для зависимостей вида 2 (см. рис. 1а) $H_m < 0$. Сплошные линии на рис. 2а–в, построенные по уравнению (4), хорошо описывают экспериментальные данные. Об этом свидетельствует коэффициент детерминации R^2 , величина которого для этих зависимостей составляет не менее 0,91.

Зависимости, характер которых соответствует рис. 1б, предлагается описывать аналитическим выражением вида

$$H = H_0 + \frac{H_m}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)}, \quad (5)$$

где H_0 – твердость материала в объеме; h – глубина слоя материала; H_m , h_m и h_0 – эмпирические константы.

Новая константа h_0 соответствует условной границе между зонами 1 и 3 (см. рис. 1б), величины H_m и h_m аналогичны соответствующим константам в уравнении (4), причем величина h_m может быть рассчитана по приближенной формуле

$$h_m \approx \frac{H_m}{4} \cdot \left(\frac{\Delta H}{\Delta h}\right)^{-1},$$

где $\frac{\Delta H}{\Delta h}$ – наклон кривой $H(h)$ в точке $h = h_0$.

Уравнение (5) также применимо при обратном соотношении твердостей, когда поверхностный слой менее твердый, чем материал в объеме. В этом случае $H_m < 0$. На рис. 2г–е сплошные линии построены по уравнению (5). Они также хорошо описывают экспериментальные данные. Соответствующие величины коэффициента детерминации R^2 – не менее 0,93. Очевидно, что уравнение (4) является частным случаем уравнения (5) при $h_0 = 0$ и $\exp\left(\frac{h}{h_m}\right) \gg 1$.

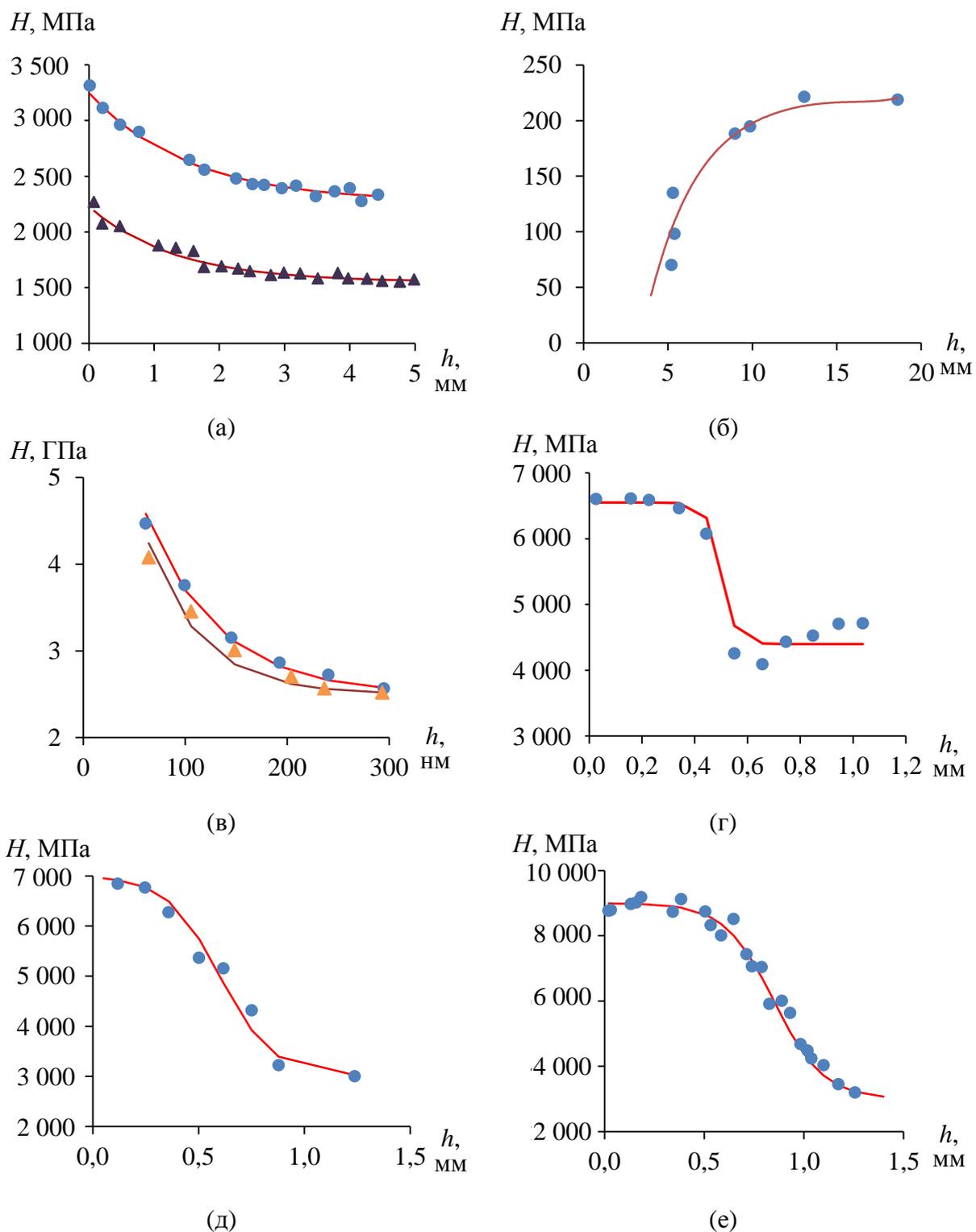


Рис. 2. Изменение твердости по глубине в зависимости от материала и технологии обработки поверхности: обкатка роликом (верхняя кривая – сталь 45Г2, нижняя – сталь 20) [19] (а); микротвердость, Cd [20] (б); нанотвердость, Ni, полировка (верхняя кривая – размер абразивного зерна 0,05 мкм, нижняя – 5 мкм) [21] (в); микротвердость, сталь 30ХГСА, лазерная закалка [22] (г); твердость по Кнупу, чугун, лазерное упрочнение [23] (д); твердость по Виккерсу, сталь 45, электронно-лучевая обработка [23] (е); точки – экспериментальные значения; линии – теоретические зависимости (см. уравнения (4) и (5))

Типичные значения толщины упрочненного слоя для поверхностей деталей из различных материалов после механической, в том числе упрочняющей, технологии приведены в таблице. Важно отметить, что они сопоставимы с величиной допустимого износа, который, по литературным данным, может иметь порядок от десятков микрометров до десятых долей миллиметра и даже до миллиметра [24–27]. Таким образом, при оценке ресурса фрикционного соединения необходимо учитывать изменение твердости в зависимости от расстояния до поверхности детали. Подобный подход обсуждается в работе [8], где для описания зависимости твердости материала от глубины используется многочленное выражение.

Типичные значения толщины упрочненного слоя
в зависимости от технологии обработки [16, 28, 29]

Технология упрочняющей обработки		Характерная толщина упрочненного слоя
Лазерная или электронно-лучевая		0,2–1 мм
Вакуумное напыление	Физическое (PVD)	1–10 мкм
	Химическое (CVD)	1–20 мкм
Ионная имплантация		0,02–0,5 мкм
Гальваническое покрытие		10 мкм – 2 мм
Термическое напыление		0,1–5 мм
Химико-термическая обработка	Цементация	0,2–2 мм
	Цианирование	0,15–1,5 мм
	Борирование	0,02–0,2 мм
	Азотирование	0,01–0,5 мм
Механическая обработка	Точение	0,03–0,2 мм
	Фрезерование	0,04–0,2 мм
	Шлифование	0,03–0,06 мм
	Поверхностное пластическое деформирование	1–20 мм

Применение выражения (5) для описания процесса изнашивания и прогнозирования ресурса фрикционного соединения показано в следующем разделе статьи.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ЛИНЕЙНОГО ИЗНОСА ОТ ПУТИ ТРЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ФРИКЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ

Для малого промежутка времени на основании уравнения (2) можно записать:

$$\frac{dh}{vdt} = K \frac{p_n}{H(h)},$$

где v – скорость относительного движения контактирующих поверхностей.

Подставляя в это уравнение зависимость $H(h)$ по формуле (5), получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\left[H_0 + \frac{H_m}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)} \right] dh = K p_n v dt.$$

Интегрируя с учетом начального условия $h = 0$ при $t = 0$, после преобразований имеем

$$(H_0 + H_m)h + H_m h_m \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{h_0}{h_m}\right)}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)} = K p_n L, \quad (6)$$

где $L = vt$ – путь трения.

Введя обозначение $\psi = \frac{H_0 + H_m}{H_0}$ (степень упрочнения), уравнение (6) можем записать в виде

$$\psi h + (\psi - 1)h_m \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{h_0}{h_m}\right)}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)} = K \left(\frac{p_n}{H_0}\right) L. \quad (7)$$

На рис. 3 показана зависимость (7). Видно, что скорость изнашивания меняется при $h = h_0$: 1) скачком при малых значениях h_m ; 2) постепенно при достаточно больших.

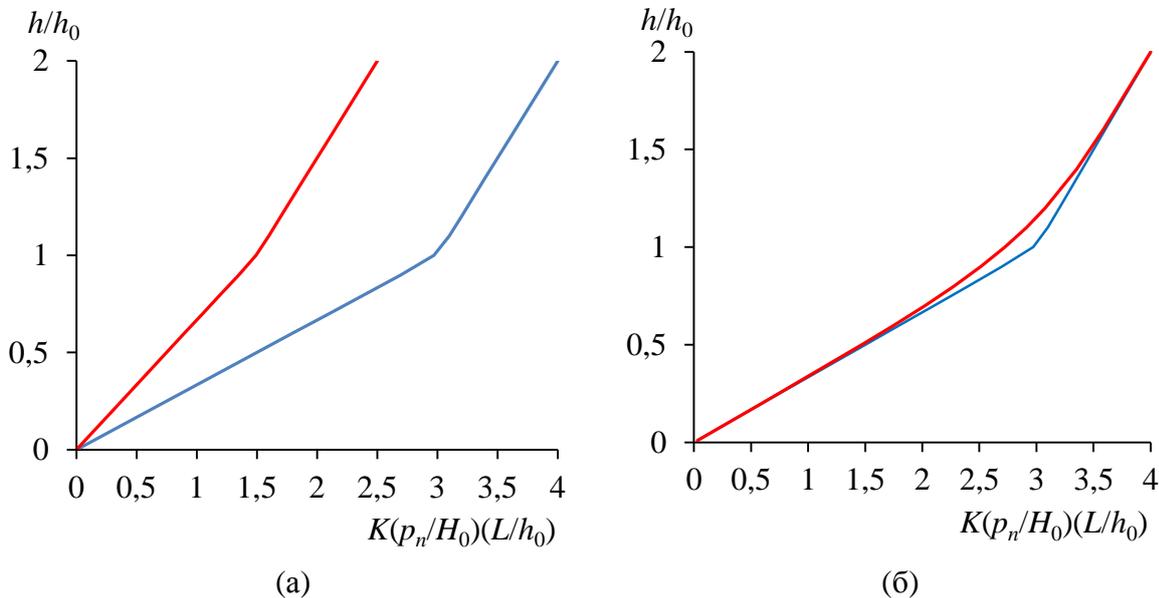


Рис. 3. Зависимость относительной величины линейного износа от безразмерного пути трения: влияние степени упрочнения ψ (верхняя кривая для $\psi = 3$, нижняя – $\psi = 1,5$) (а); влияние параметра h_m (верхняя кривая для $h_m/h_0 = 0,2$, нижняя – $h_m/h_0 = 0,02$) (б)

Принимая в качестве критерия наступления предельного состояния достижение допустимого износа $h_{\text{пред}}$, из уравнения (7) получаем формулу для прогнозирования ресурса фрикционного узла в виде предельного пути трения

$$L_{\text{пред}} = \left(\frac{H_0}{K p_n}\right) \left[\psi h_{\text{пред}} + (\psi - 1)h_m \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{h_0}{h_m}\right)}{1 + \exp\left(\frac{h_{\text{пред}} - h_0}{h_m}\right)} \right]. \quad (8)$$

Как видно из уравнения (8) и рис. 3, повысить ресурс фрикционного соединения можно повышением степени упрочнения ψ и толщины покрытия h_0 . При этом, варьируя соотношение этих факторов, можно выбрать их оптимальное сочетание, что показано на рис. 4 [30]. Видно, что менее износостойкое (менее твердое) покрытие может обеспечить больший ресурс, чем существенно более износостойкое (более твердое) покрытие меньшей толщины.

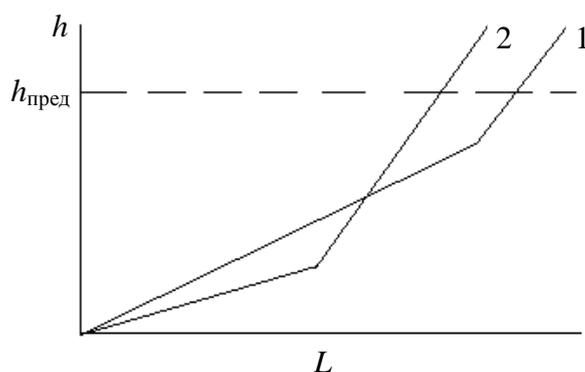


Рис. 4. Изнашивание упрочненных деталей:
 1 – менее твердое, но более толстое покрытие; 2 – более твердое,
 но менее толстое покрытие; $h_{\text{пред}}$ – предельная величина линейного износа

Рассмотрим расчет ресурса пары трения на примере режущего инструмента (сверла) из быстрорежущей стали Р6М5 после лазерной обработки [31]. Изнашивание опытных образцов проводилось в натуральных испытаниях при сверлении отверстий в пластине из стали 12Х18Н10Т сверлами из стали Р6М5 после лазерной обработки. Критерием предельного состояния служила величина предельного износа 0,1 мм или поломка сверла [31].

На рис. 5 приведена зависимость микротвердости стали Р6М5 от глубины после лазерного воздействия мощностью 40 Вт. Как видно из рис. 5, глубина зоны термического воздействия составляет порядка 60 мкм, что сравнимо с величиной предельного износа. Формула (5) хорошо описывает изменение микротвердости по глубине при следующих параметрах в формуле (5): $H_0 = 6\,500$ МПа, $H_m = 2\,500$ МПа, $h_0 = 60$ мкм, $h_m = 2,3$ мкм. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,91$.

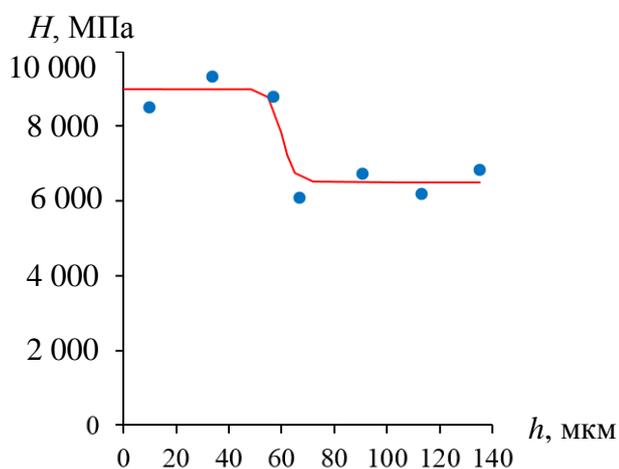


Рис. 5. Изменение микротвердости в поперечном сечении зоны лазерной обработки:
 точки – экспериментальные значения [31]; линия – расчет по формуле (5)

На рис. 6 показан процесс изнашивания исследуемых образцов в относительных координатах. Исчерпанием ресурса считается достижение предельной величины линейного износа (пунктирная линия на рис. 6). Прогнозирование ресурса по формуле Арчарда без учета изменения микротвердости по глубине приводит к относительной погрешности 19 % при использовании в расчете постоянной величины микротвердости $H = H_0$ (твердость неупрочненного материала) и 13 % при использовании постоянной

величины $H = H_0 + H_m$ (максимальная микротвердость). В первом случае прогноз ресурса оказывается заниженным, во втором – завышенным. Величина погрешности зависит от степени упрочнения ψ . Например, при $\psi = 2$ погрешности составят уже 37 и 25 % соответственно. Обратим внимание, что в первом случае прогноз ресурса оказывается заниженным, что плохо с экономической точки зрения (часть ресурса окажется неиспользованной), а во втором случае – завышенным, что плохо с точки зрения надежности (есть вероятность отказа до проведения профилактических мероприятий или окончания эксплуатации).

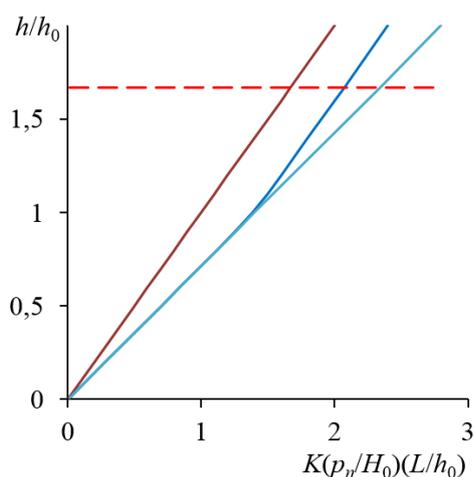


Рис. 6. Зависимость относительной величины линейного износа от безразмерного пути трения. Средняя линия – расчет по формуле (7); левая и правая линии – расчет по формуле Арчарда при $H = H_0$ и $H = H_0 + H_m$ соответственно; пунктирная – предельное значение линейного износа

Необходимо отметить, что при расчетах зависимости величины линейного износа от пути трения, представленной на рис. 6, предполагалось, что коэффициент изнашивания K остается постоянным в процессе изнашивания и не изменяется на границе зоны термического воздействия. Если есть основания считать это предположение справедливым, то из уравнений (6) и (7) можно рассчитать величину коэффициента K по результатам эксперимента для данной фрикционной пары в данных условиях трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена аналитическая зависимость, позволяющая прогнозировать ресурс фрикционного соединения по критерию допустимого (предельного) износа с учетом влияния упрочняющей обработки на механические свойства материала трущихся деталей. В основу положено известное в трибологии уравнение Арчарда, связывающее интенсивность изнашивания с нагрузкой на фрикционный контакт и твердостью поверхностных слоев материалов компонентов пары трения. Уравнение Арчарда обобщено на случай изнашивания деталей с градиентом твердости по глубине материала, возникшим в результате воздействия упрочняющей технологии. Проанализированы экспериментальные результаты по изменению твердости материала в зависимости от расстояния до рабочей поверхности детали и выделены типичные зависимости, отражающие это изменение. Предложено обобщенное уравнение, описывающее различные варианты указанной зависимости и включающее предложенные ранее аналогичные уравнения как частные случаи.

Параметрами предложенной аналитической зависимости, отражающими изменение механических свойств материала в результате упрочняющего воздействия, являются степень упрочнения, средняя толщина упрочненного слоя и градиент механических свойств (твердости) по глубине материала. На примере упрочняющей обработки в виде лазерного воздействия показано влияние указанных параметров на ресурс конкретного изделия. Показано, что игнорирование градиента твердости при расчете ресурса фрикционного сопряжения может привести к существенной погрешности в оценке величины ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: ЛКИ. 2014. С. 24–32.
2. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин. М.: Юрайт. 2017. 264 с.
3. ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology / ed. G.E. Totten. ASM International. 1992. V. 18. 942 p.
4. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content // *Wear*. 1995. V. 183–185. P. 443–457.
5. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
6. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
7. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. 1995. Т. IV-1. 864 с.
8. Fundamentals of friction and wear on the nanoscale / eds. E. Gnecco, E. Meyer. Springer. 2015. 704 p.
9. Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: Красанд. 2012. 512 с.
10. Mukras S.M.S. Computer simulation / Prediction of wear in mechanical components // *Advances in tribology*. V. 2020. 15 p.
11. Иванов А.С. Конструирование машин. Развитие основ. Прочность, жесткость, надежность. СПб.: Политехник. 2021. 238 с.
12. Molinari J.-F., Aghababaei R., Brink T., Frérot L., Milanese E. Adhesive wear mechanisms uncovered by atomistic simulations // *Friction*. 2018. V. 6 (3). P. 245–259.
13. Popov V.L., Pohrt R. Adhesive wear and particle emission: Numerical approach based on asperity-free formulation of Rabinowicz criterion // *Friction*. 2018. V. 6 (3). P. 260–273.
14. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М. 2014. 336 с.
15. Stolarsky T.A. Tribology in Machine Design. Oxford e.a.: Butterworth-Heinemann. 1990. 300 p.
16. Williams J. Engineering Tribology. Cambridge e.a.: Cambridge University Press. 2005. 488 p.
17. Rabinowicz E. The wear coefficient – magnitude, scatter, uses // *ASME Trans. Journal of Lubrication Technology*. 1981. V. 103 (2). P. 188–193.
18. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения // *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 3 (15). С. 5–14.

19. Филяев А.Т. Исследование износостойкости сталей, упрочненных наклепом. Минск: Наука и техника. 1974. 168 с.

20. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение. 1978. 213 с.

21. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроразмерах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // *Физика твердого тела*. 2008. Т. 50. Вып. 12. С. 2113–2142.

22. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Барабонова И.А., Раткевич Г.В. Влияние лазерной закалки на микроструктуру и абразивную износостойкость стали 30ХГСА // *Металлы*. 2020. № 1. С. 54–58.

23. ASM Handbook: Heat treating / eds. J. Dossett, G.E. Totten. ASM International. 1991. V. 4. 1012 p.

24. Решиков В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач. М.: Машиностроение. 1975. 232 с.

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

26. Трение, изнашивание и смазка: справочник. М.: Машиностроение. 1978. Кн. 1. 400 с.

27. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. СПб.: Академия транспорта РФ. 2001. 304 с.

28. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология. М.: Юрайт. 2021. 236 с.

29. Горленко А.О., Горленко О.А., Проскурин А.С. Триботехнология. М.: Юрайт. 2017. 187 с.

30. Bayer R.G. Engineering design for wear. New York: Marcel Dekker, Inc. 2004. 416 p.

31. Огин П.А., Мерсон Д.Л., Кондрашина Л.А., Васькин К.Я. Влияние режимов лазерной модификации на структуру, свойства и износостойкость мелкогабаритного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 // *Вектор науки ТГУ*. 2015. № 4 (34). С. 83–88.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О прогнозировании ресурса узлов трения по критерию допустимого износа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 5–17.

ON FORECASTING THE LIFE OF FRICTION UNITS ACCORDING TO THE CRITERION OF APPROVED WEAR

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

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

The article continues the publication of the results of the authors' research on the prediction of wear of parts with a hardness gradient along the depth of the material resulting from machining or the use of hardening techniques. To describe the change in the hardness of a material with distance from the friction surface, a more universal analytical dependence was obtained than in previous works of the authors. The previously proposed formulas are

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

particular cases of this more general relationship. On the basis of the analytical dependence describing the change in hardness with depth of the material, the J. Archard equation known in tribology for estimating the amount of wear is extended to the case of surface wear with a hardness gradient in depth. A formula was also obtained for predicting the resource of a friction joint according to the criterion of acceptable wear. A specific example of resource estimation in the form of a friction path value, on which the limiting value of linear wear is reached, is given. It is shown that ignoring the hardness gradient when estimating the service life of friction joint can lead to a significant error.

Keywords: friction, wear, surface hardening, hardness gradient, resource, prediction.

Поступила в редакцию/received: 20.06.2022; после рецензирования/revised: 26.08.2022;
принята/accepted: 09.09.2022

УДК 621.891: 621.313.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: and.mit@westa69.ru

© Митюрёв А.А., 2022

В статье приведено описание конструкций двух установок, использующихся при исследовании электрических характеристик жидких металлов на основе галлия и его эвтектических сплавов для жидкометаллических контактов электрических машин и аппаратов. Установки позволяют определять удельное электрическое сопротивление жидких металлов независимо от конструкции жидкометаллических узлов без образования интерметаллических соединений с галлием по ГОСТ 8024-90 в диапазоне температур 30...180 °С. Экспериментально подтвержден линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления $\rho = f(T)$ галлийсодержащих материалов для жидкометаллических контактов. Для этой температурной зависимости определены значения коэффициента удельного электрического сопротивления жидких металлов при температуре 30 °С и температурный коэффициент электрического сопротивления галлия и его эвтектических сплавов (% по массе) GI (77,5 % Ga, 22,5 % In); GIS (62 % Ga, 25 % In, 13 % Sn); GISZ (64 % Ga, 12 % In, 13 % Sn, 11 % Zn), которые применяются в современных многоамперных электрических аппаратах, в том числе композиционных жидкометаллических контактах.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, жидкометаллический контакт, граничное трение, изнашивание, галлий, эвтектический сплав, удельное электрическое сопротивление, температурная зависимость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-17-24