

## **К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ РЕСУРСА ФРИКЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО 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., 2023

Предложены аналитические зависимости для прогнозирования износа деталей с покрытием, твердость которого отличается от твердости основного материала. Для описания зависимости твердости материала от расстояния до поверхности трения использована формула, полученная с помощью энергетического метода оценки усилия внедрения индентора в пластический материал. В основу расчета ресурса узла трения по критерию износа положено известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда, обобщенное на случай нелинейной (степенной) зависимости интенсивности изнашивания от твердости изнашиваемого материала и приложенной нормальной нагрузки. Показано, что в этом случае игнорирование градиента твердости при оценке ресурса узла трения приводит к еще более существенной погрешности, чем в случае линейной зависимости интенсивности изнашивания от твердости. В зависимости от соотношения твердостей покрытия и подложки оценка ресурса узла трения оказывается либо завышенной, либо заниженной, что негативно влияет на надежность и эффективность оборудования. В первом случае возрастает вероятность возникновения отказа, во втором случае часть ресурса остается неиспользованной.

*Ключевые слова:* трение, изнашивание, покрытие, твердость, ресурс, прогнозирование.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-33-39**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что более 80 % отказов современных технических устройств обусловлены износом деталей, поэтому еще на стадии проектирования необходимо прогнозировать технический ресурс узлов трения [1]. В процессе эксплуатации может возникнуть необходимость уточнить первоначальный прогноз и оценить остаточный ресурс узла. В любом случае критерием предельного состояния узла трения является предельно допустимый износ [1]. Для оценки ресурса изделия по критерию предельно допустимого износа необходимо использовать аналитические зависимости, выражающие величины линейного, объемного или массового износа как функции времени или пути трения. Кроме того, эти зависимости должны содержать параметры фрикционного соединения, влияющие на величину износа: нормальную нагрузку или давление, прочностные характеристики материалов трущихся деталей, параметры окружающей среды и т.п.

Одной из зависимостей, описывающих динамику процесса изнашивания, является известное уравнение Арчарда (или Хольма – Арчарда) [2–6]:

$$V = K \frac{N}{H} L, \quad (1)$$

где  $V$  – объем изношенного материала;  $K$  – коэффициент износа;  $N$  – нормальная нагрузка;  $H$  – твердость (микротвердость) более мягкого материала пары трения;  $L$  – путь трения.

В уравнении (1) твердость обычно считается величиной постоянной, т.е. не зависящей от пути трения. Между тем в узлах трения очень часто используются детали с переменной по глубине твердостью, т.е. фактически твердость является функцией пути трения. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете величины износа и в конечном счете при оценке ресурса узла трения.

В статье [7] предложена аналитическая зависимость для прогнозирования ресурса фрикционного соединения деталей с градиентом твердости по глубине по критерию предельно допустимого износа. При этом, как и в уравнении (1), величина износа считается прямо пропорциональной нормальной нагрузке  $N$  и обратно пропорциональной твердости материала  $H$ , что является некоторым допущением.

Целью настоящей работы является обобщение уравнения (1) на случай более сложной нелинейной зависимости величины износа от указанных параметров ( $N$  и  $H$ ) при переменной твердости материала изнашиваемых деталей по глубине.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Прямая пропорциональность интенсивности изнашивания величине нормальной нагрузки и обратная пропорциональность твердости материала (или аналогичной прочностной характеристике) подтверждается многими экспериментальными исследованиями. Однако также немалое число экспериментальных работ свидетельствует о более сложном (чаще всего степенном) характере взаимозависимости указанных выше параметров. Для аналитического описания этих зависимостей Ю.Н. Дроздов предложил выражать их с помощью безразмерных комплексов (критериев) [8]. В случае преобладания механического разрушения поверхностей трения интенсивность изнашивания определяется набором критериев, т.е.

$$I_h = F(\Phi_a, \Phi_{cm}, \Phi_y, \Phi_{ш}), \quad (2)$$

где  $I_h$  – линейная интенсивность изнашивания;  $\Phi_a$  – комплекс, характеризующий напряженное состояние контакта;  $\Phi_{cm}$  – комплекс, характеризующий толщину смазочного слоя в контакте;  $\Phi_y$  – комплекс, характеризующий усталостную прочность материалов трущихся деталей;  $\Phi_{ш}$  – комплекс, характеризующий влияние шероховатости на изнашивание.

Наиболее важным при любом характере изнашивания является критерий  $\Phi_a = p_n/H$ , или  $\Phi_a = f p_n/H$ , где  $p_n$  – номинальное давление,  $f$  – коэффициент трения. Используя указанный критерий и объединяя менее значимые критерии в коэффициент изнашивания  $K$ , получаем уравнение, аналогичное (1):

$$I_h = K \left( \frac{p_n}{H(h)} \right)^m,$$

или

$$h = K \left( \frac{p_n}{H(h)} \right)^m L, \quad (3)$$

где  $h$  – линейный износ (толщина изношенного слоя);  $m$  – эмпирический показатель степени.

Твердость материала трущихся деталей предполагается функцией глубины внедрения индентора, которая практически совпадает с величиной линейного износа, полученного в процессе изнашивания материала. В гетерогенном материале (например, покрытии на подложке) причина зависимости твердости от глубины  $H(h)$  очевидна. В

гомогенном материале причина ее может быть в изменении структуры, размеров кристаллических зерен и т.п.

В статье [9] предложена зависимость  $H(h)$  следующего вида:

$$\begin{cases} H(h) = H_f \text{ при } h \leq C\delta, \\ H(h) = H_s + 2C(H_f - H_s)\frac{\delta}{h} - C^2(H_f - H_s)\left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \text{ при } h > C\delta, \end{cases} \quad (4)$$

где  $h$  – координата, направленная от поверхности в глубь материала (глубина);  $H_f$  и  $H_s$  – твердости покрытия и подложки соответственно;  $\delta$  – толщина покрытия;  $C$  – эмпирический коэффициент.

Зависимость (4) получена на основе энергетического метода оценки усилия внедрения индентора в пластический материал, что отличает ее от аналогичных зависимостей, полученных простой аппроксимацией результатов измерения твердости на поперечном или косом шлифе детали с покрытием на разных расстояниях от поверхности. Все величины в предложенной зависимости имеют конкретный физический смысл, в том числе коэффициент  $C$ . Он равен критическому значению отношения глубины внедрения индентора к толщине покрытия, при котором на результате измерения твердости начинает сказываться влияние подложки. Теоретический анализ и обобщение экспериментальных результатов показывают, что наиболее вероятный диапазон значений коэффициента  $C$  0,25...0,3.

Величина  $H$  – твердость индентирования, измеренная при нагрузке на индентор, направленной по нормали к поверхности трения. В процессе абразивного изнашивания от величины  $H$  зависит глубина следа абразивной частицы при микрорезании или пластическом оттеснении материала. При адгезионном изнашивании твердость влияет на размер площадки фактического контакта неровностей шероховатости и, соответственно, на объем образовавшейся частицы износа при разрушении этого контакта. При измерении твердости индентирования индентор фактически является моделью абразивного зерна или единичной неровности шероховатости, его внедрение в анизотропный или гетерогенный материал подобно контактированию абразивного зерна или единичной неровности.

Приведенные на рис. 1 примеры описания зависимости  $H(h)$  выражением (4) подтверждают хорошее соответствие теоретической зависимости характеру экспериментальных данных.

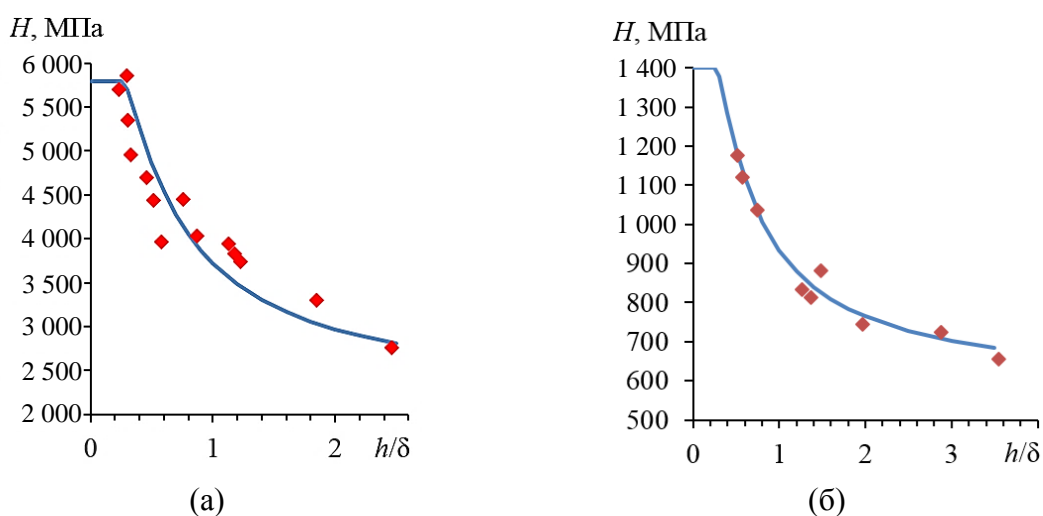


Рис. 1. Зависимость твердости от относительной величины внедрения индентора для поверхностей с покрытием: покрытие NiPdRe на латуни (а); покрытие NiP на меди (б)

При  $h \leq C\delta$  твердость постоянна:  $H = H_f$ . Тогда при постоянной скорости изнашивания из уравнения (3) имеем

$$h = K \left( \frac{p_n}{H_f} \right)^m L,$$

или в безразмерном виде

$$\frac{h}{\delta} = K \left( \frac{p_n}{H_f} \right)^m \cdot \frac{L}{\delta}.$$

При  $h = C\delta$  путь трения  $L = L_0$ . С этого момента на величину твердости начинает влиять подложка. Введем безразмерный путь трения

$$\lambda = K \left( \frac{p_n}{H_f} \right)^m \cdot \frac{L}{\delta}.$$

Очевидно, что  $\lambda_0 = C$ .

При  $h \geq C\delta$  для элементарного участка пути трения  $dL$  можно записать

$$[H(h)]^m dh = K p_n^m dL,$$

где  $H(h)$  определяется зависимостью (4).

Введя новую переменную  $z = h/\delta$ , проинтегрируем обе части полученного выражения:

$$J(z) = \int_C^z F(z) = K \left( \frac{p_n}{H_f} \right)^m \left( \frac{L}{\delta} - \frac{L_0}{\delta} \right) = \lambda - \lambda_0,$$

где  $F(z)$  – правая часть уравнения (4).

Учитывая, что интеграл в левой части  $J(z)$  есть функция верхнего предела и что  $\lambda_0 = C$ , получаем

$$J(z) + C = \lambda. \quad (5)$$

В общем случае интеграл  $J(z)$  может быть найден только численно. При целочисленных значениях показателя степени  $m$  интеграл выражается аналитически, но полученные выражения громоздки, поэтому в настоящей статье не приводятся.

Уравнение (5) связывает безразмерную величину линейного износа  $z$  с безразмерной величиной пути трения  $\lambda$ , т.е. оно может использоваться для прогнозирования ресурса фрикционного узла в виде максимального пути трения по критерию максимально допустимого износа. В это уравнение в качестве параметров входят коэффициент  $C$ , показатель степени  $m$  и соотношение твердостей  $\chi = H_f/H_s$ . Их влияние на зависимость величины линейного износа от пути трения проанализировано ниже.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние параметра  $\chi$  на зависимость относительной величины износа от относительного пути трения показано на рис. 2. При  $h/\delta = C$  скорость изнашивания меняется: при более мягкой подложке (кривые 1 и 2) она увеличивается, более твердой (кривая 3) – уменьшается. Когда величина линейного износа достигнет толщины покрытия, погрешность в оценке величины пути трения, которая возникнет, если не учитывать влияние подложки, составит 27 % при  $\chi = 1,5$ ; 42 % при  $\chi = 2$ ; 52 % при  $\chi = 0,5$ . При этом если  $\chi > 1$  (подложка мягче покрытия), то ресурс (предельный путь трения) переоценен, при  $\chi < 1$  ресурс недооценен. Так, при  $\chi = 0,5$  и  $h/\delta = 1$  реальный ресурс в 2 раза превышает его же оценку для гомогенного материала.

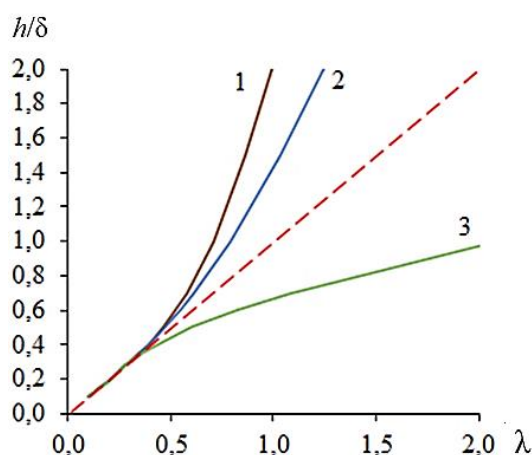


Рис. 2. Влияние параметра  $\chi$  на зависимость относительного износа от безразмерного пути трения при  $m = 3$ : линия 1 –  $\chi = 2$ ; линия 2 –  $\chi = 1,5$ ; линия 3 –  $\chi = 0,5$ ; пунктир –  $\chi = 1$  (гомогенный материал); коэффициент  $C = 0,25$

Влияние показателя степени  $m$  в уравнении (3) на зависимость относительной величины износа от относительного пути трения показано на рис. 3. Качественно это влияние вполне предсказуемо: с ростом величины показателя степени  $m$  влияние неоднородности материала усиливается. Количественные оценки следующие: при относительной величине износа  $h/\delta = 1$  погрешность в оценке величины пути трения, связанная с игнорированием влияния подложки, составляет 27 % при  $m = 2$  и 42 % при  $m = 3$  (в обоих случаях  $\chi = 2$ ).

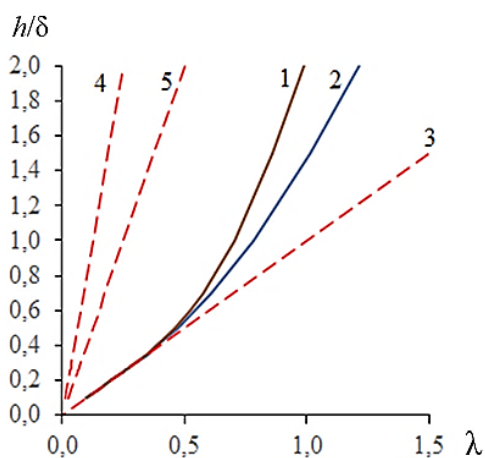


Рис. 3. Влияние параметра  $m$  на зависимость относительного износа от безразмерного пути трения: сплошные линии – гетерогенный материал (1 –  $m = 3$ ,  $\chi = 2$ ; 2 –  $m = 2$ ,  $\chi = 2$ ); пунктир – гомогенный материал (3 –  $\chi = 1$ ; 4 –  $H = H_s$ ,  $m = 3$ ; 5 –  $H = H_s$ ,  $m = 2$ )

Еще более значительные погрешности в расчете максимального пути трения возникают, если при оценке ресурса использовать в качестве твердости постоянную величину, равную твердости подложки  $H_s$ . Оценка ресурса фрикционного соединения в этом случае оказывается сильно заниженной: в 5,6 раза при  $m = 3$  и в 3,1 раза при  $m = 2$  для  $h/\delta = 1$  и  $\chi = 2$  (см. рис. 3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что аналитические зависимости, аналогичные зависимости (5), не могут претендовать на высокую точность прогнозирования износа фрикционных соединений ввиду случайного характера процесса изнашивания, их применение в ряде случаев может быть полезным. Они могут использоваться, например, для прогнозирования повышения износостойкости фрикционного соединения при применении новых материалов и покрытий, а также для прогнозирования ресурса узла трения на стадии проектирования, когда соответствующие статистические данные отсутствуют или их объем недостаточен.

Поскольку для повышения износостойкости трущихся деталей очень широко используются различного рода покрытия рабочих поверхностей, используемые для прогнозирования ресурса аналитические зависимости должны учитывать неоднородность механических свойств материалов компонентов фрикционной пары.

Предложенная в данной работе методика прогнозирования ресурса фрикционного соединения по критерию предельно допустимого износа обобщает предложенные нами ранее аналогичные расчетные методики [7, 10].

Анализ полученных результатов подтверждает существенное влияние соотношения твердостей покрытия и основного материала трущихся деталей на оценку ресурса узлов трения. Предложенная методика такой оценки, помимо непосредственной цели, может использоваться при обработке экспериментальных данных по определению коэффициента износа  $K$  – основной характеристики износостойкости той или иной пары трения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин. М.: Юрайт. 2017. 264 с.
2. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
4. Ludema K.C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. Boca Raton: CRC Press. 1996. 264 p.
5. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. 1995. Т. IV-1. 864 с.
6. Fundamentals of friction and wear on the nanoscale / eds. E. Gnecco, E. Meyer. Springer. 2015. 704 p.
7. 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.
8. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // *Современная трибология: итоги и перспективы*. 2007. С. 24–32.
9. Измайлов В.В. Влияние покрытий на процессы механического и электрического контактирования шероховатых поверхностей // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 6. С. 1026–1047.
10. 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.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. К методике оценки ресурса фрикционного соединения деталей с покрытием по критерию предельного износа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 3 (19). С. 33–39.

**ON THE METHODOLOGY  
OF A FRICTION CONNECTION RESOURCE EVALUATION  
FOR COATED PARTS BY LIMITING WEAR CRITERION**

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

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

Analytical dependencies are proposed to predict the wear of coated parts, the hardness of which differs from the hardness of the base material. To describe the dependence of the material hardness on the distance to the friction surface, a formula was used that was obtained using the energy method for estimating the force of indenter penetration into a plastic material. The calculation of the resource of the friction unit according to the wear criterion is based on the J. Archard equation known in tribology, generalized to the case of a nonlinear (power-law) dependence of the wear rate on the hardness of the wear material and the applied normal load. It is shown that in this case, ignoring the hardness gradient when estimating the resource of a friction unit leads to an even more significant error than in the case of a linear dependence of the wear rate on hardness. Depending on the ratio of the hardness of the coating and the substrate, the resource of the friction unit is either overestimated or underestimated, which negatively affects the reliability and efficiency of the equipment. In the first case, the probability of a failure increases, in the second, part of the resource remains unused.

*Keywords:* friction, wear, coating, hardness, resource, prediction.

Поступила в редакцию/received: 05.05.2023; после рецензирования/revise: 11.05.2023;  
принята/accepted: 15.05.2023