

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.2.082.18

О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ НА РЕСУРС ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

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

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2022

Предложена эмпирическая формула для описания зависимости твердости (микротвердости) материала H от глубины h , являющейся следствием упрочнения при обработке детали или применения упрочняющей технологии. Формула содержит два эмпирических параметра, характеризующих степень упрочнения материала и толщину упрочненного слоя. Предложенная аналитическая зависимость $H(h)$ позволила обобщить известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда, связывающее интенсивность изнашивания с твердостью материала изнашиваемой детали, на случай контактирования деталей с переменной по глубине материала твердостью. На основе обобщенного уравнения Арчарда получена формула для количественного прогнозирования ресурса фрикционного сопряжения по критерию допустимого линейного износа. Количественной оценкой ресурса выступает максимальное значение пути трения. Проанализировано влияние параметров упрочненного слоя на оценку величины ресурса фрикционного сопряжения и ее погрешности, возникающей при определении ресурса без учета упрочнения поверхностного слоя. Показано, что эта погрешность может быть существенной, особенно при значительной степени упрочнения.

Ключевые слова: трение, износ, поверхностное упрочнение, ресурс, прогнозирование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-5-14

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование ресурсов современных технических устройств на стадии проектирования и в процессе эксплуатации является актуальной задачей с точки зрения обеспечения их надежности. К таким устройствам относятся, в частности, фрикционные соединения, широко распространенные в современных машинах и механизмах. Большинство узлов трения относится к изделиям с постепенными отказами [1]. Для них критерием исчерпания ресурса служит достижение предельного состояния, количественной характеристикой которого является величина предельного износа. Примерами узлов трения, ресурс которых определяется величиной предельного износа, могут служить зубчатые передачи, опоры скольжения, шлицевые соединения, передачи винт-гайка [2, 3].

Согласно концепции Ю.Н. Дроздова [3], линейную интенсивность изнашивания можно представить как функцию набора безразмерных параметров Φ_i , характеризующих условия эксплуатации, свойства материала и т.п.:

$$I_h = k\Phi_1^a \cdot \Phi_2^b \cdot \dots, \quad (1)$$

где $I_h = h/L$; h – линейный износ (толщина изношенного слоя); L – путь трения; k – коэффициент пропорциональности; a, b и т.д. – показатели степени.

К числу основных безразмерных параметров (критериев), характеризующих механическое изнашивание, относятся [2, 3]:

$\Phi_1 = p_n/H$ – критерий напряженного состояния контакта, где $p_n = N/A_n$ – номинальное контактное давление; H – твердость (микротвердость) материала; N – нормальная контактная нагрузка; A_n – номинальная площадь контакта. Это основной критерий, применимый к расчетам практически всех видов изнашивания;

$\Phi_2 = \delta/\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ – критерий относительной толщины смазочного слоя, где δ – толщина смазочного слоя; R_{a1} и R_{a2} – параметры шероховатости контактирующих поверхностей.

Для приработанных поверхностей уравнение (1) можно записать в виде [2]:

$$I_h = k\Phi_1 = k \frac{p_n}{H}. \quad (2)$$

По сути, уравнение (2) есть не что иное, как преобразованное уравнение Дж. Арчарда, которое используется в трибологии для описания основных видов изнашивания [4–7]:

$$I_V = \frac{V}{L} = k \frac{N}{H}, \quad (3)$$

где I_V – объемная интенсивность изнашивания; V – объем изношенного материала. Очевидно, $V = hA_n$, $N = p_nA_n$, что при подстановке в уравнение (3) превращает его в уравнение (2).

Уравнение (2) позволяет прогнозировать ресурс фрикционного узла в форме предельного пути трения (до достижения предельного состояния):

$$L_{\text{пред}} = \frac{h_{\text{пред}}H}{kp_n}, \quad (4)$$

где $h_{\text{пред}}$ – предельная величина износа. Зная скорость относительного скольжения трущихся поверхностей, легко пересчитать величину ресурса, выраженную в единицах длины, в величину ресурса в единицах времени.

Недостатком уравнения (4) является то, что твердость материала трущихся деталей предполагается постоянной, точнее, не зависящей от глубины (расстояния до поверхности). В большинстве случаев это не выполняется.

Цель данной работы – обобщить уравнения (2) и (4) на случай переменной по глубине материала твердости.

ИЗМЕНЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО ГЛУБИНЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ

Для достижения поставленной цели необходимо прежде всего аналитически описать изменение твердости по глубине материала деталей фрикционного сопряжения.

Для повышения износостойкости деталей узлов трения широко используют различные технологии упрочняющей обработки их рабочих поверхностей: химико-термические, механические, электромеханические, лазерные и т.п. [8, 9]. В результате твердость поверхностных слоев увеличивается. Упрочнение поверхностных слоев может быть следствием механической обработки как таковой, например точения, шлифования и т.п. В результате отношение поверхностной твердости к объемной может достигать до 1,5...2,5 раза, а глубина упрочненного слоя достигает 200 мкм [10]. Все вышеизложенное иллюстрируется рис. 1 и 2, на которых представлены зависимости микротвердости поверхностных слоев H от глубины слоя h , построенные на основании данных работы [11].

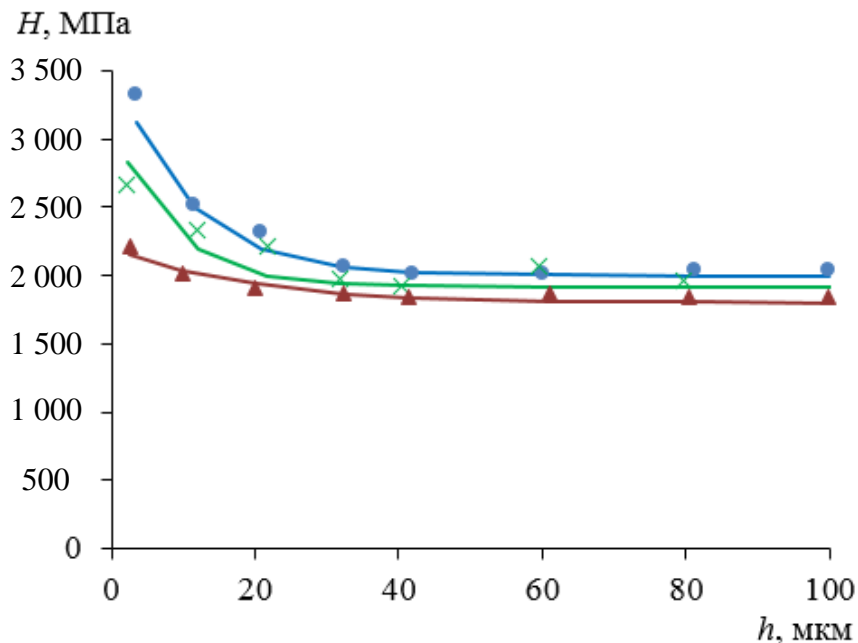


Рис. 1. Зависимость микротвердости поверхностных слоев от глубины слоя для образцов из стали 30ХГСА после электромеханической обработки при различных силах тока: $I = 750$ А (верхняя кривая); $I = 600$ А (средняя кривая); $I = 450$ А (нижняя кривая). Точки – экспериментальные значения [11], линии – аппроксимирующие зависимости по уравнению (5)

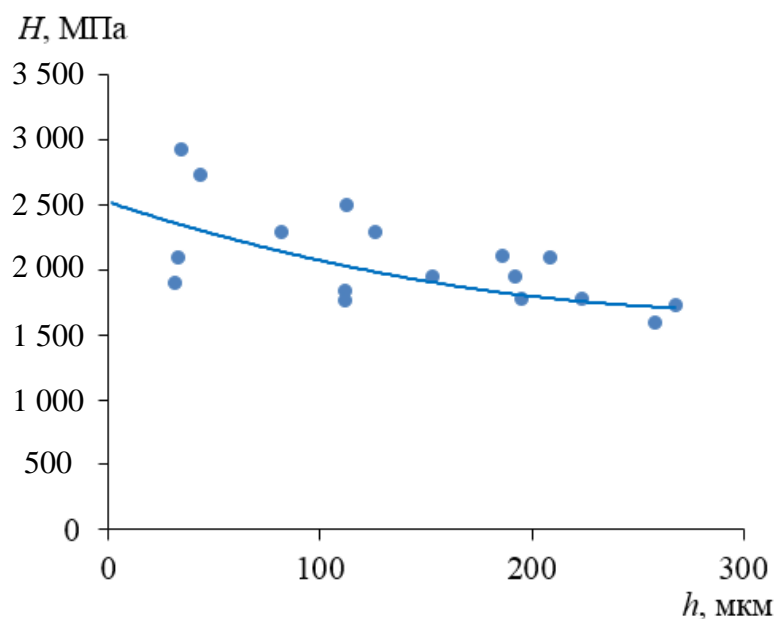


Рис. 2. Зависимость микротвердости поверхностных слоев от глубины слоя для образцов из стали 20 после точения. Точки – экспериментальные значения [11], линия – аппроксимирующая зависимость по уравнению (5)

Большой разброс значений микротвердости на рис. 2 связан с наличием разных структурных составляющих в структуре исследуемой стали [11].

Зависимости $H(h)$, представленные на рис. 1 и 2, и многие другие аналогичные хорошо описываются уравнением вида

$$H(h) = H_0 + H_m e^{-\frac{h}{h_m}}, \quad (5)$$

где H_0 – твердость неупрочненного материала вдали от поверхности; $H_0 + H_m$ – твердость приповерхностных слоев материала; h_m – параметр, характеризующий толщину упрочненного слоя.

Безразмерная величина $\psi = \frac{H_0 + H_m}{H_0} = 1 + \frac{H_m}{H_0}$ характеризует степень упрочнения поверхностных слоев. Параметры H_0 , H_m , h_m и ψ для зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, приведены в таблице.

Параметры зависимости $H(h)$ (см. уравнение (5))

Параметр	Материал, технология и режим обработки			
	Сталь 30ХГСА, электромеханическая обработка			Сталь 20, точение
	$I = 750 \text{ А}$	$I = 600 \text{ А}$	$I = 450 \text{ А}$	
H_0 , МПа	2 000	1 900	1 500	1 500
H_m , МПа	1 600	1 200	415	1 050
h_m , мкм	10	8	18	160
ψ	1,8	1,6	1,3	1,7

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛА С ГРАДИЕНТОМ ТВЕРДОСТИ

Запишем уравнение (2) для бесконечно малого элемента пути трения $dL = vdt$ (где v – относительная скорость трущихся поверхностей), на котором толщина изношенного слоя h увеличится на величину dh :

$$\frac{dh}{vdt} = k \frac{p_n}{H(h)}.$$

Подставив в это уравнение зависимость $H(h)$ из уравнения (5), после преобразований получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\left(H_0 + H_m e^{-\frac{h}{h_m}} \right) dh = kp_n v dt.$$

Решая последнее с учетом начального условия $h = 0$ при $t = 0$, получаем уравнение, связывающее толщину изношенного слоя h с величиной пути трения $L = vt$:

$$H_0 h + H_m h_m \left(1 - e^{-\frac{h}{h_m}} \right) = K p_n L. \quad (6)$$

Для упрощения дальнейшего анализа приведем уравнение (6) к безразмерному виду, используя относительные переменные $\chi = \frac{h}{h_m}$ (относительная толщина изношенного слоя) и $\Lambda = \left(\frac{kp_n}{H_0} \right) \left(\frac{L}{h_m} \right)$ (безразмерный путь трения):

$$\Lambda = \chi + (\psi - 1)(1 - e^{-\chi}), \quad (7)$$

где $\psi = 1 + \frac{H_m}{H_0}$ (см. выше). Зависимость (7) иллюстрируется рис. 3.

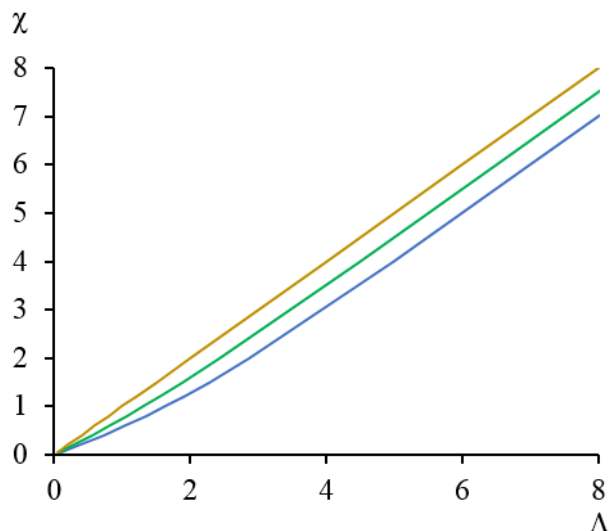


Рис. 3. Зависимость безразмерной толщины изношенного слоя χ от безразмерного пути трения Λ при различных величинах степени упрочнения: $\psi = 2$ (нижняя кривая); $\psi = 1,5$ (средняя кривая); верхняя линия – расчет толщины изношенного слоя при постоянной твердости $H = H_0$

Из рис. 3 закономерно следует, что одинаковая величина линейного износа для упрочненной поверхности достигается на большем пути трения, чем для неупрочненной. С другой стороны, на одинаковом пути трения упрочненная поверхность изнашивается меньше, чем неупрочненная, и чем больше степень упрочнения, тем меньше линейный износ.

В абсолютных величинах (например, для стали 30ХГСА после электро-механической обработки при токе 750 А) получаются следующие результаты. Принимая типичные значения $k = 10^{-5}$ и $p_n = 1$ МПа, а также $h_m = 10$ мкм и $H_0 = 2\,000$ МПа из таблицы, получаем $h = 60$ мкм на пути трения 14 км. Такая же величина линейного износа для неупрочненной поверхности будет достигнута уже на пути трения 12 км.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ФРИКЦИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО ИЗНОСА

Ресурс фрикционного сопряжения в форме максимального (предельного) пути трения может быть спрогнозирован на основании формулы (6) при $h = h_{\text{пред}}$, где $h_{\text{пред}}$ – величина предельно допустимого линейного износа:

$$L_{\text{пред}} = \frac{1}{k} \left[\frac{H_0}{p_n} h_{\text{пред}} + \frac{H_m}{p_n} h_m \left(1 - e^{-\frac{h_{\text{пред}}}{h_m}} \right) \right]. \quad (8)$$

Величина предельного износа принимается исходя из назначения фрикционного сопряжения и предъявляемых к нему требований [1]. Например, для уплотнения это может быть величина утечки уплотняемой среды, для направляющих станка – точность обработки, для зубчатых передач – уровень динамических нагрузок и т.п. [1].

Из рис. 3 видно, что игнорирование градиента твердости и расчет ресурса по постоянной величине твердости H_0 приводит к заниженным его оценкам. Это хорошо с точки зрения обеспечения надежности сопряжения, так как уменьшается вероятность отказа изделия в межремонтный период, и плохо с экономической точки зрения, поскольку часть ресурса остается неиспользованной.

Влияние параметров упрочненного слоя – степени упрочнения и его толщины – иллюстрируется рис. 4 и 5. Используются безразмерные величины, как и в уравнении (7). Из рис. 4 следует, что увеличение степени упрочнения пропорционально увеличивает ресурс, при этом чем больше величина предельного износа, тем больше ресурс.

На рис. 5 показано, что ресурс нелинейно растет с ростом величины h_m , характеризующей толщину упрочненного слоя. Безусловно, величина h_m не тождественна последней, но между ними существует пропорциональная зависимость.

Рис. 5 также подтверждает, что с ростом степени упрочнения увеличивается ресурс сопряжения в виде максимального пути трения.

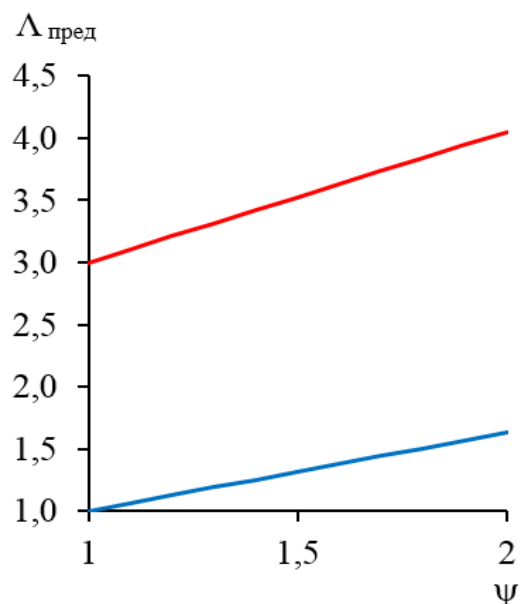


Рис. 4. Зависимость безразмерного максимального пути трения (ресурса) от степени упрочнения поверхности; верхняя кривая – $\chi_{\text{пред}} = h_{\text{пред}}/h_m = 3$, нижняя – $\chi_{\text{пред}} = 1$

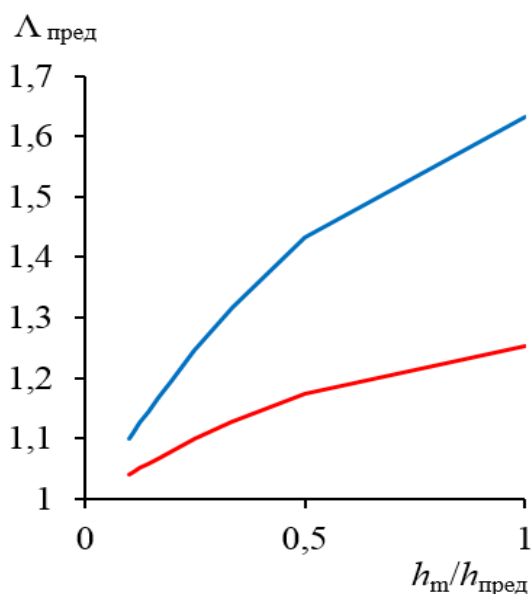


Рис. 5. Зависимость безразмерного максимального пути трения (ресурса) от толщины упрочненного слоя; верхняя кривая – $\psi = 2$, нижняя – $\psi = 1,4$

В заключение оценим погрешность прогнозирования ресурса фрикционного сопряжения без учета упрочнения поверхностных слоев. Относительная погрешность рассчитывалась по формуле $E = \left(1 - \frac{\Lambda_{\text{пред}}^*}{\Lambda_{\text{пред}}}\right) \cdot 100 \%$, где $\Lambda_{\text{пред}}^*$ и $\Lambda_{\text{пред}}$ – значения максимального пути трения (ресурса) соответственно без учета и с учетом упрочнения поверхностных слоев. Погрешность оценки прогнозирования ресурса в зависимости от относительной величины линейного износа представлена на рис. 6. На начальных

стадиях изнашивания погрешность может быть весьма существенной, затем она снижается. С ростом степени упрочнения поверхности погрешность увеличивается.

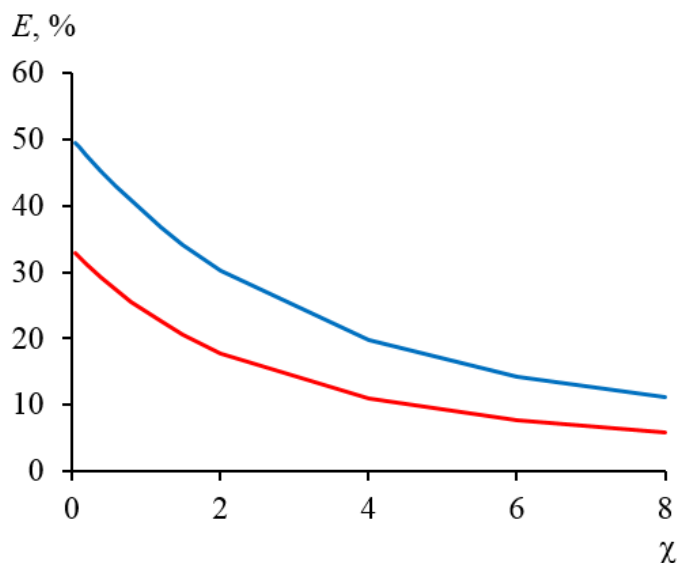


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности оценки ресурса фрикционного сопряжения от относительной величины линейного износа; верхняя линия – $\psi = 2$, нижняя – $\psi = 1,5$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена аналитическая зависимость, описывающая изменение твердости (микротвердости) H по глубине слоя материала h вследствие упрочнения при обработке детали или вследствие применения упрочняющей технологии. Эмпирическими параметрами этой зависимости являются степень упрочнения и глубина упрочненного слоя.

На основании предложенной аналитической зависимости $H(h)$ известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда, связывающее интенсивность изнашивания с твердостью изнашиваемой поверхности, обобщено на случай контактирования деталей с переменной по глубине материала твердостью.

На основании обобщенного уравнения Арчарда получена формула для прогнозирования ресурса фрикционного сопряжения по критерию допустимого линейного износа. Количественной оценкой ресурса выступает максимальное значение пути трения. Исследовано влияние параметров упрочненного слоя на оценку величины ресурса фрикционного сопряжения.

Проведен анализ погрешности оценки ресурса фрикционного сопряжения, выполненной без учета упрочнения поверхностного слоя трущихся деталей. Установлено, что эта погрешность может быть существенной, особенно при значительной степени упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин. М.: Юрайт, 2017. 264 с.

2. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
3. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: ЛКИ, 2014. С. 24–32.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
5. Stolarsky T.A. Tribology in Machine Design. Oxford e.a.: Butterworth – Heineman, 1990. 300 p.
6. Williams J. Engineering Tribology. Cambridge e.a.: Cambridge University Press, 2005. 488 p.
7. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
8. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 4 (4). С. 16–22.
9. Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З. Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 23–31.
10. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
11. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наукова думка, 1984. 272 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосоприжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 3 (15). С. 5–14.

ON THE INFLUENCE OF HARDENING TREATMENT OF FRICTION SURFACES ON THE RESOURCE OF TRIBOCOUPLE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

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

An empirical formula is proposed to describe the dependence of the hardness (microhardness) of the material H on the depth h , which is a consequence of hardening during the processing of a part or the use of hardening technology. The formula contains two empirical parameters characterizing the degree of hardening of the material and the thickness of the hardened layer. The proposed analytical dependence $H(h)$ made it possible to generalize the well-known in tribology Archard's equation, which relates the wear rate to the hardness of the material of the wear part, to the case of contact of parts with a hardness variable over the depth of the material. Based on the generalized Archard's equation, a formula was obtained for quantitative prediction of the frictional interface resource by the

criterion of admissible linear wear. The quantitative assessment of the resource is the maximum value of the friction path. The influence of the parameters of the hardened layer on the estimation of the value of the frictional coupling resource and its error arising when determining the resource without taking into account the hardening of the surface layer is analyzed. It is shown that this error can be significant, especially for a significant degree of hardening.

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

REFERENCES

1. Gorlenko O.A., Tikhomirov V.P., Bishutin G.A. Prikladnaya mekhanika: tribotekhnicheskiye pokazateli kachestva mashin [Applied mechanics: tribological indicators of the quality of machines]. Moscow: Yurayt, 2017. 264 p.
2. Dotsenko A.I., Buyanovsky I.A. Osnovy tribotekhniki: uchebnik. [Fundamentals of tribotechnics: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2014. 336 p.
3. Drozdov Yu.N. Wear prediction taking into account mechanical, physico-chemical and geometric factors // Modern Tribology: Results and Prospects. Moscow: LKI, 2014, pp. 24–32.
4. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Treniye, smazka, iznos [Friction, lubrication, wear]. Moscow: Fizmatlit, 2007. 368 p.
5. Stolarsky T.A. Tribology in Machine Design. Oxford e.a.: Butterworth – Heineman, 1990. 300 p.
6. Williams J. Engineering Tribology. Cambridge e.a.: Cambridge University Press, 2005. 488 p.
7. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniy [Contact interaction mechanics and friction physics. From nanotribology to earthquake dynamics]. Moscow: Fizmatlit, 2013. 352 p.
8. Barchukov D.A., Tsygvintsev A.V., Afanasieva L.E. Features of the formation of the structure and properties of high-speed steel during pulse-arc surfacing. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2019. No 4 (4), pp. 16–22. (In Russian).
9. Migranov A.M., Migranov M.Sh., Kolosova N.V., Akhmetova E.Z. Innovative materials and coatings with the effect of adaptation when cutting metals. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2021. No 4 (12), pp. 23–31. (In Russian).
10. Khopin P.N., Shishkin S.V. Tribologiya [Tribology]. Moscow: Yurait, 2021. 236 p.
11. Ryzhov E.V. Tekhnologicheskkiye metody povysheniya iznosostoykosti detaley mashin [Technological methods for increasing the wear resistance of machine parts]. Kyiv: Naukova Dumka, 1984. 272 p.

Поступила в редакцию/received: 13.06.2022; после рецензирования/revised: 05.07.2022;
принята/accepted: 22.07.2022