



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2014.4.8>

УДК 621.785.523

ББК 39.2

## НОВЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ

Бахрачева Юлия Сагидулловна

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики и химии,  
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Волгоградский филиал  
[bakhracheva@yandex.ru](mailto:bakhracheva@yandex.ru)  
ул. им. милиционера Буханцева, 48, 400120 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе показано, что износостойкость материала поверхностного слоя в условиях усталостного изнашивания можно оценивать величиной удельной энергоемкости. Из проведенных испытаний видно, что обработка стали термоциклической нитроцементацией позволяет существенно повысить нагрузочную способность поверхности трения.

**Ключевые слова:** износостойкость, поверхность трения, сила трения, удельная энергоемкость, нитроцементация.

Одной из важнейших задач, стоящих перед машиностроением, является повышение надежности и долговечности машин и механизмов. Из практики эксплуатации машин известно, что до 90 % причин их отказов связаны с изнашиванием, возникающим в условиях контактирования исполнительных звеньев при их относительном перемещении или ударе.

Повышение ресурса работы машин требует оптимизации задачи выбора износостойких материалов, поисков эффективных конструктивных и технологических решений. Эта проблема осложняется тем, что при проектировании оборудования детали машин на износ рассчитать не могут, основное внимание уделяется обеспечению конструктивной прочности.

Износостойкость и коэффициент трения являются реакцией материала на процессы трения и изнашивания, реализуемые в конкретном трибосопряжении. Для некоторых классов сталей и сплавов в настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал по их износостойкости.

Несмотря на большой объем накопленной информации, единого мнения о механиз-

ме изнашивания материалов нет. Несопоставимость, а в ряде случаев и противоречивость данных о закономерностях и механизме абразивного изнашивания предопределили отсутствие достоверных методов расчета на износостойкость при проектировании машин, механизмов и инструмента.

Низкая износостойкость деталей машин обуславливает нежелательный перерасход металла и очень низкий коэффициент его полезного использования, что связано с большими затратами энергетических ресурсов и материальных средств. Одним из основных путей повышения износостойкости деталей машин является выбор материалов с оптимальным сочетанием механических свойств. Выбор сталей для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, осложняется тем, что износостойкость – величина переменная и определяется условиями контактного взаимодействия, главным образом соотношением свойств абразива и металла.

Отсутствие достоверной научной методики, подобной прочностному расчету, для выбора износостойких материалов и сложности, связанные с проведением испытаний на

изнашивание, обусловили повышенное внимание трибологов к проблеме поиска критериев оценки износостойкости материалов.

Выбор износостойких сталей и сплавов по достоверным критериям износостойкости осложняется тепловым воздействием на узлы трения, что вызывает разупрочнение сопряженных поверхностей и может сопровождаться изменением начальных характеристик сталей и сплавов. Процессы, происходящие при абразивном изнашивании, сложны, многообразны и требуют дальнейшего систематического изучения с учетом разновидностей контактного взаимодействия.

Предлагаемый подход к оценке фрикционной надежности нитроцементованной стали базируется на предположении о том, что текущий износ  $\Delta r(z, t)$  в точках поверхности трения с координатой  $z$  определяется отношением энергии, аккумулированной за время  $t$  элементарным объемом поверхностного слоя (доли  $\xi$  удельной работы внешних сил трения  $A_{\text{тр}}^{\text{уд}}(z, t) = N_{\text{тр}}^{\text{уд}}(z) \cdot t$ ) к критической плотности энергии локального разрушения материала поверхностного слоя (его износостойкости  $U_{\text{оп}}(z) = \xi \cdot U_{\omega}(z)$ ):

$$\Delta r(z, t) = \xi \cdot N_{\text{тр}}^{\text{уд}}(z) \cdot t / U_{\text{оп}}(z), \quad (1)$$

где  $N_{\text{тр}}^{\text{уд}}(z)$  – удельная мощность сил трения в очаге деформации;  $\xi$  – коэффициент аккумуляции энергии материалом поверхностного слоя с заданной микрогеометрией;  $U_{\omega}(z)$  – мнимая плотность энергии по Г. Фляйшеру [7];  $t$  – время изнашивания.

Величина удельной мощности сил трения в точках поверхности износа с координатой  $z$  определяется произведением модуля вектора контактного касательного напряжения  $\tau(z) = \tau_z$  и модуля вектора скорости скольжения  $V(z) = V_z$  металла в этих точках.

$$N_{\text{тр}}^{\text{уд}}(z) = \tau_z \cdot V_z, \quad (2)$$

где

$$\tau_z = f_z \cdot p_z. \quad (3)$$

Коэффициент трения в условии (3) определяется как [12]:

$$f_z = f_z^* \cdot e^{-p_z / HB_z}, \quad (4)$$

где  $HB_z = 2,61 \cdot \sigma_{sz}$  – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю;  $f_z^*$  – параметр, определяемый условиями трения

$$f_z^* = \frac{0,618 \cdot \tau_z}{\tau_{sz} \cdot (1 - e^{-1,25(p_z / \sigma_{sz})})}, \quad \tau_{sz} \approx 0,58 \cdot \sigma_{sz}. \quad (5)$$

Для определения нормального номинального давления  $p_z$  в рассматриваемых точках с координатой  $z$  в условии (3) используем приближенное условие пластичности Треска – Сен-Венана

$$p_z = \sigma_{sz} - \sigma_{zz} \quad (6)$$

и логарифмический закон упрочнения в очаге деформации

$$\sigma_{sz} = \sigma_{s0} + m \ln \mu_z, \quad (7)$$

где  $\sigma_{sz}$  – текущий предел текучести в сечении  $z$ ;  $\sigma_{s0}$  – предел текучести перед переходом;  $m$  – средневзвешенный модуль упрочнения.

Осевую компоненту тензора напряжений в сечении с координатой  $z$  в условии (6) определяем по известной зависимости Г.Э. Аркулиса [4]:

$$\sigma_{zz} = \frac{b}{a} \left( \sigma_{s0} - \frac{m}{a} \right) \left( 1 - \frac{1}{\mu_z^a} \right) + m \frac{b}{a} \ln \mu_z + \frac{\sigma_0}{\mu_z^a}, \quad (8)$$

где  $b = (1 + f / \text{tg} \alpha) / (1 - f / \text{tg} \alpha)$  и  $a = b - 1$  – промежуточные коэффициенты.

Модуль вектора скорости перемещения металла на контактной поверхности в точках сечения  $z$  в условии (2)

$$V_z = \sqrt{V_{zz}^2 + V_{rz}^2}, \quad (9)$$

где  $V_{zz} = \frac{\mu_z}{\mu} V_1$  – осевая составляющая скорости перемещения металла на контактной поверхности в сечении  $z$ ;  $V_1$  – скорость волочения;  $V_{rz} = V_{zz} \cdot \text{tg} \alpha$  – радиальная составляющая скорости перемещения металла на контактной поверхности в сечении  $z$ .

Совокупность уравнений (1)–(9) определяет методику оценки удельной мощности сил трения.

Удельную энергоёмкость материала поверхностного слоя  $U_{\text{оп}}(z) = U_{\text{оп}z}$  в точках с координатами  $z$  и коэффициент аккумуляции энергии  $\xi$  в условии (1) оценим, используя зависимость Г. Фляйшера [7] для мнимой плотности энергии в виде отношения номинального касательного напряжения к линейной интенсивности изнашивания  $U_{\text{оп}z} = \tau_z / I_{\text{hz}}$  с учетом выражения  $U_{\text{оп}z} = f_z \cdot p_{cz} \cdot n_{\text{кп}z}$  на основе энергетического подхода к усталостной те-

ории изнашивания. Приравнивая, получим  $U_{\text{оз}} = \tau_z / I_{\text{hz}} = 2 \cdot (v+1) \cdot p_{cz} \cdot n_{kpz}$ . Учитывая, что  $U_{\text{опз}} = \xi \cdot U_{\text{оз}}$  (см. формулу (1)) и принимая  $\xi = (2 \cdot (v+1))^{-1}$ , получим выражение для критической плотности энергии локального усталостного разрушения материала:

$$U_{\text{опз}} = p_{cz} \cdot n_{kpz} \quad (10)$$

Используя выражения для контурного давления  $p_{cz}$  и критического числа циклов  $n_{kpz}$ :

$$p_{cz} = \sigma_{0,2} \left( \frac{\tau_z}{f_z / \sigma_{0,2}} \right)^{\frac{v_2}{f_z / \sigma_{0,2}}} = \sigma_{0,2} (p_z / \sigma_{0,2})^{(p_z / \sigma_{0,2})}, \quad (11)$$

$$n_{kpz} = 10^{a \left( \frac{\sigma_s + \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2} p_{cz}} \right)}, \quad (12)$$

где  $\sigma_s, \sigma_{0,2}$  – предел прочности и условный предел текучести материала поверхностного слоя, показатель

$$U_{\text{опз}} = p_{cz} \cdot n_{kpz} = \sigma_{0,2} \cdot (p_z / \sigma_{0,2})^{(p_z / \sigma_{0,2})} \cdot 10^{a(\sigma_s / \sigma_{0,2} + \sigma_{0,2} / p_{cz})}. \quad (13)$$

Анализ приведенного выражения для оценки энергоемкости поверхностного слоя показывает, что ее величина зависит только от номинального контактного давления  $p_z$  и в области многоциклового усталости ( $0 < p_z \leq \sigma_{0,2}$ ) изменяется от  $U_{\text{оп min}} = \sigma_{0,2} \cdot 10^{a(\sigma_s / \sigma_{0,2} + 1)}$  (при  $p_z = \sigma_{0,2}$ ) до (если  $p_z = 0,36788 \cdot \sigma_{0,2}$ )

$$U_{\text{оп max}} = \sigma_{0,2} \cdot n_{kpz \text{ max}} = 0,6922 \cdot \sigma_{0,2} \cdot 10^{a \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} + 1,445 \right)}. \quad (14)$$

Последнее выражение определяет единственно возможное максимальное значение энергоемкости как предельную величину энергии до разрушения элементарного объема поверхностного слоя из данного материала. Очевидно, что величина  $U_{\text{оп max}}$  зависит только от свойств материала и может являться его новой механической характеристикой, количественно (в Дж/мм<sup>3</sup>) оценивающей способность материала сопротивляться усталостному изнашиванию в любых условиях фрикционного взаимодействия.

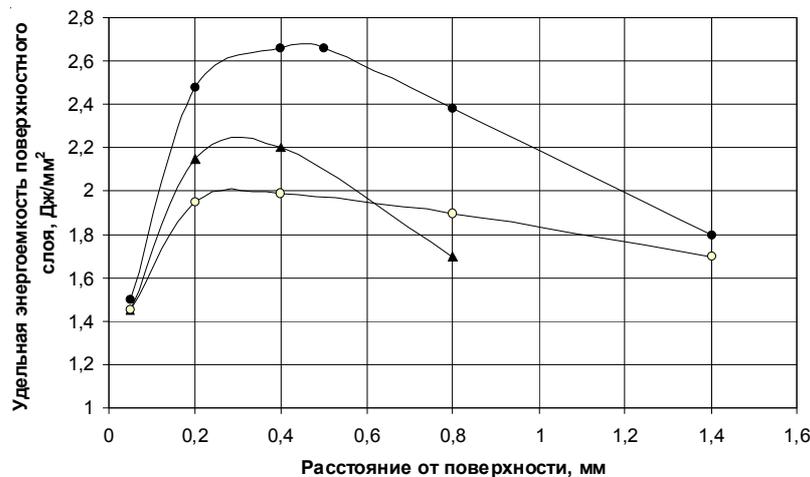
Значения физико-механических характеристик в уравнениях (10)–(14) следует определять в функции температуры в очаге деформации.

Совокупность уравнений (1)–(14) представляет собой модель процесса изнашивания поверхности.

На рисунке приведено распределение удельной энергоемкости диффузионного слоя стали после химико-термоциклической обработки (ХТЦО) 5 и 9 циклов, а также после изотермической нитроцементации в зависимости от расстояния от поверхности.

Из проведенных испытаний видно, что обработка стали по режимам ХТЦО позволяет существенно повысить нагрузочную способность поверхности трения.

Таким образом, износостойкость материала поверхностного слоя в условиях усталост-



Распределение удельной энергоемкости диффузионного слоя стали в зависимости от расстояния от поверхности

• – девять циклов; Δ – пять циклов; ○ – изотермическая нитроцементация

ного изнашивания можно оценивать величиной удельной энергоёмкости, которая зависит от его физико-механических характеристик.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анцупов, А. В. Оценка интегральной энергетической интенсивности изнашивания серийного волоочильного инструмента / А. В. Анцупов, А. С. Быков, М. В. Налимова // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения : междунар. сб. науч. тр. / под ред. Н. Н. Огаркова. – Магнитогорск : МГТУ, 2006. – С. 45–49.

2. Бахрачева, Ю. С. Оперативная оценка склонности материалов к хрупкому разрушению при статическом и циклическом нагружении : дис. ... канд. техн. наук / Бахрачева Юлия Сагидуллоевна. – Великий Новгород, 2004. – 126 с.

3. Влияние содержания азота на структуру и свойства нитроцементованной стали / В. И. Шапочкин, Л. М. Семенова, Ю. С. Бахрачева, Е. Л. Гюлиханданов, С. В. Семенов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 9. – С. 12–18.

4. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях : справочник / Ю. Н. Дроздов. – М. : Машиностроение, 1986. – 223 с.

5. Качество управления производством с позиций синергетики / Л. М. Семенова, В. Б. Хлебников, Ю. С. Бахрачева, С. В. Семенов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2012. – № 7. – С. 120–126.

6. Семенова, О. В. Неразрушающий контроль твердосплавного волоочильного инструмента / О. В. Семенова, О. И. Бобкова, Е. А. Пудов // Сб. тех. докл. науч.-технич. конф по итогам НИР, МГТУ. – Магнитогорск, 1993. – С. 40–44.

7. Фляйшер, Г. К вопросу о количественном определении трения и износа / Г. Фляйшер // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. – М. : Наука, 1982. – С. 285–296.

8. Шапочкин, В. И. Нитроцементация в условиях периодического изменения состава атмосферы / В. И. Шапочкин, Л. М. Семенова, Ю. С. Бахрачева // Материаловедение. – 2010. – № 8. – С. 52–58.

9. Bakhacheva, Ju. S. Fracture toughness prediction by means of indentation test / Ju. S. Bakhacheva // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2013. – Vol. 9, № 3. – P. 21–24.

10. Baron, A. A method for impact strength estimation / A. Baron, J. Bakhacheva // Mechanika. – 2007. – Vol. 66, № 4. – P. 31–35.

11. Effect of nitrogen content on the structure and properties of nitrocarburized steel / V. I. Shapochkin, L. M. Semenova, Y. S. Bakhacheva, E. L. Gyulikhandanov, S.V. Semenov // Metal Science and Heat Treatment. – 2011. – Vol. 52, № 9-10. – P. 413–419.

12. Khokhlov, V. M. Wear laws at elastic interaction / V. M. Khokhlov // Russia Engineering Research. – 1996. – Vol. 16, № 12. – P. 11–12.

13. Semenova, L. M. Laws of formation of diffusion layers and solution of the diffusion problem in temperature-cycle carbonitriding of steel / L. M. Semenova, Yu. S. Bakhacheva, S. V. Semenov // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – Vol. 55, № 1-2. – P. 34–37.

**REFERENCES**

1. Antsupov A.V., Bykov A.S., Nalimova M.V. Otsenka integralnoy energeticheskoy intensivnosti iznashivaniya seriynogo volochilnogo instrumenta [Evaluation of Integral Energetic Intensity of Wear of Serial Drawing Tool]. *Sovremennye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya. Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Modern Design Methods and Technologies of Metallurgical Engineering]. Ogarkova N.N., ed. Magnitogorsk, MGTU Publ., 2006, pp. 45-49.

2. Bakhacheva Yu.S. *Operativnaya otsenka sklonnosti materialov k khrupkomu razrusheniyu pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii: Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Operative Assessment of the Propensity of a Material to Brittle Fracture Under Static and Cyclic Loading. Cand. techn. sci. diss.]. Velikiy Novgorod, 2004. 126 p.

3. Shapochkin V.I., Semenova L.M., Bakhacheva Yu.S., Gyulikhandanov E.L., Semenov S.V. Vliyaniye soderzhaniya azota na strukturu i svoystva nitrotsementovannoy stali [The Influence of Nitrogen on the Structure and Properties of Nitrocarburized Steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2010, no. 9, pp. 12-18.

4. Drozdov Yu.N. *Trenie i iznos v ekstremalnykh usloviyakh* [Friction and Wear in Extreme Conditions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 223 p.

5. Semenova L.M., Khlebnikov V.B., Bakhacheva Yu.S., Semenov S.V. Kachestvo upravleniya proizvodstvom s pozitsiy sinergetiki [Production Management Quality From the Synergetics Viewpoint]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10, Innovatsionnaya deyatel'nost'* [Science Journal of Volgograd State University. Innovative Activity], 2012, no. 7, pp. 120-126.

6. Semenova O.V., Bobkova O.I., Semenova O.V., Pudov E.A. Nerazrushayushchiy kontrol tverdospavnogo volochilnogo instrumenta [Non-destructive Control of Carbide Drawing Tools].

*Sbornik tekhnicheskikh dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam NIR, MGTU* [Collection of Technical Reports of Science and Technical Conference Based on the Results of NIR, MSTU]. Magnitogorsk, 1993, pp. 40-44.

7. Flyaysher G. K voprosu o kolichestvennom opredelenii treniya i iznosa [On the Quantitative Determination of Friction and Wear]. *Teoreticheskie i prikladnye zadachi treniya, iznosa i smazki mashin* [Theoretical and Applied Tasks of Friction, Wear and Machines Lubrication]. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 285-296.

8. Shapochkin V.I., Semenova L.M., Bakhracheva Yu.S. Nitrotsementatsiya v usloviyakh periodicheskogo izmeneniya sostava atmosfery [Carbonitriding in the Conditions of Periodic Changes in the Composition of the Atmosphere]. *Materialovedenie*, 2010, no. 8, pp. 52-58.

9. Bakhracheva Yu.S. Fracture Toughness Prediction by Means of Indentation Test. *International*

*Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 21-24.

10. Baron A.A, Bakhracheva Yu.S. A Method for Impact Strength Estimation. *Mechanika*, 2007, vol. 66, no. 4, pp. 31-35.

11. Shapochkin V.I., Semenova L.M., Bakhracheva Yu.S., Gyulikhandanov E.L., Semenov S.V. Effect of Nitrogen Content on the Structure and Properties of Nitrocarburized Steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, no. 9-10, pp. 413-419.

12. Khokhlov V.M. Wear Laws at Elastic Interaction. *Russia Engineering Research*, 1996, vol. 16, no.12, pp.11-12.

13. Semenova L.M., Bakhracheva Yu.S., Semenov S.V. Laws of Formation of Diffusion Layers and Solution of the Diffusion Problem in Temperature-Cycle Carbonitriding of Steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 55, no. 1-2, pp. 34-37.

## A NEW METHOD OF PREDICTING THE WEAR RESISTANCE OF STEEL

**Bakhracheva Yuliya Sagidullova**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physics and Chemistry, Volgograd Branch of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

bakhracheva@yandex.ru

Bukhantseva St., 48, 400120 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** One of the most important challenges facing the engineering industry is the increasing reliability and durability of machines and mechanisms. In the practice of operating machines it is known that up to 90 % of the causes of their failures are associated with the wear that occurs under the conditions of contact between the executive links with their relative move or kick.

The increase of the service life of machines requires optimization of the choice of wear-resistant materials as well as the search for effective design and technological solutions. This problem is complicated by the fact that in the manufacture of machine parts, the main attention is paid to ensuring the structural strength.

Low-wear resistance of machine parts causes unwanted wastage of metal and a very low coefficient of its estimated useful life, which is associated with high costs of energy resources and material resources. One of the main ways to improve wear resistance of machine parts is the choice of materials with the optimum combination of mechanical properties.

The selection of wear-resistant steels and alloys according to reliable criteria of wear resistance is complicated by the effects of heat on the friction that causes softening of the mating surfaces and may be accompanied by changes in the initial characteristics of steels and alloys. The processes occurring during abrasive wear are challenging, diverse, and require further systematic study considering varieties of contact interaction.

It is shown that the wear resistance of the material of the surface layer in terms of the fatigue wear can be estimated by the value of the specific energy consumption. From the performed tests, it is evident that the thermocyclic treatment of steel by carbonitriding can significantly increase the load capacity of the friction surface.

**Key words:** wear resistance, surface of friction, force of friction, energy intensity, carbonitriding.