

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, УПРОЧНЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. 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., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2022

Представлены результаты исследований характеристик износостойкости стальных образцов, упрочненных лазерной закалкой с помощью непрерывного излучения многоканального (48 лучей) CO₂-лазера, в условиях абразивного изнашивания. Показано, что градиент механических свойств по глубине, являющийся особенностью лазерного воздействия на материал, приводит к увеличению скорости изнашивания в процессе трения. Это обстоятельство необходимо учитывать при экспериментальном определении характеристик износостойкости материалов трущихся пар. Отмечено, что известное уравнение изнашивания Хольма – Арчарда применимо и в случае изнашивания деталей с градиентом твердости по глубине. Получена формула для расчета коэффициента изнашивания в подобных условиях. На основании установленных теоретических зависимостей экспериментально определены характеристики износостойкости образцов сталей марок Р6М5 и 30ХГСА после лазерного поверхностного упрочнения: коэффициент изнашивания и удельная энергия разрушения материала при изнашивании. Показано, что лазерное воздействие снижает коэффициент трения и повышает износостойкость поверхностей образцов из быстрорежущей стали на 20...30 %.

Ключевые слова: лазерная закалка, конструкционная сталь, быстрорежущая сталь, коэффициент изнашивания, удельная энергия разрушения материала при изнашивании.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-2-38-46

ВВЕДЕНИЕ

Количественные характеристики процессов изнашивания поверхностей деталей машин и механизмов необходимы для прогнозирования долговечности различных технических устройств, обеспечения их надежной и эффективной работы. Теоретическое описание процессов изнашивания затруднено вероятностным характером этих процессов и многообразием механизмов образования частиц износа в процессе контактного взаимодействия поверхностей. Наиболее распространенными, по-видимому, являются абразивный, усталостный и адгезионный механизмы (виды) изнашивания. К этим и некоторым другим видам изнашивания применима так называемая формула Хольма – Арчарда [1–3]:

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

где I_V – объемная интенсивность изнашивания, $I_V = V/L$ (V – объем изношенного материала; L – путь трения); N – нормальная нагрузка на контакт; H – твердость

(микротвердость) поверхностных слоев материала трущихся тел, в которых происходит разрушение в результате фрикционного взаимодействия.

Очевидно, что величина N характеризует внешнее воздействие на фрикционный контакт и зависит в основном от конструкции и назначения узла трения. Микротвердость выступает интегральной характеристикой прочностных свойств материала трущихся деталей и в значительной мере определяет такие важные характеристики контакта, как фактическое контактное давление и, следовательно, фактическая площадь контакта, на которой и происходит непосредственное фрикционное взаимодействие контактирующих поверхностей. Все остальные характерные особенности данного механизма изнашивания находят отражение в величине коэффициента изнашивания k . Например, при абразивном механизме изнашивания величина k зависит от формы и размеров абразивных частиц или шероховатости более твердой поверхности, при усталостном механизме – от параметров усталостной прочности материала, при адгезионном – от энергии когезии и адгезии и кристаллографических параметров материалов [2, 3]. Собственно, коэффициент изнашивания k и характеризует износостойкость того или иного материала [1, 3]. При этом основной способ его определения – экспериментальный.

Как следует из уравнения (1), увеличение микротвердости поверхностных слоев материалов контактирующих деталей повышает их износостойкость. Одним из способов повышения микротвердости поверхностных слоев является лазерное поверхностное упрочнение.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа параметров, характеризующих износостойкость стальных поверхностей, упрочненных лазерным излучением при различных энергетических режимах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Из формулы (1) следует расчетная зависимость для определения коэффициента изнашивания по результатам эксперимента:

$$k = \frac{hA_nH}{NL}, \quad (2)$$

где h – глубина изношенного слоя; A_n – номинальная площадь контакта. При этом микротвердость H обычно считается постоянной величиной, не зависящей от глубины индентирования. Последнее не всегда справедливо. Пример зависимости микротвердости от глубины внедрения алмазной пирамиды по методу Виккерса приведен на рис. 1. Представленную зависимость можно аппроксимировать выражением вида

$$H(h) = H_0 e^{-\alpha h}, \quad (3)$$

где $H_0 \approx 37\,200$ МПа; $\alpha \approx -0,52$ мкм⁻¹.

Из уравнений (1) и (3) можно получить выражение для скорости изнашивания в виде

$$\frac{dh}{dt} = \frac{kNv}{A_nH_0} e^{\alpha h}, \quad (4)$$

где v – скорость относительного скольжения трущихся поверхностей. Из уравнения (4) видно, что в процессе изнашивания скорость данного процесса увеличивается по

экспоненте, что связано с уменьшением твердости материала. Поскольку уравнение (4) есть не что иное, как дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, его решением будет зависимость величины линейного износа от времени t или пути трения L , поскольку $L = vt$:

$$h = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha k N L}{A_n H_0} \right). \quad (5)$$

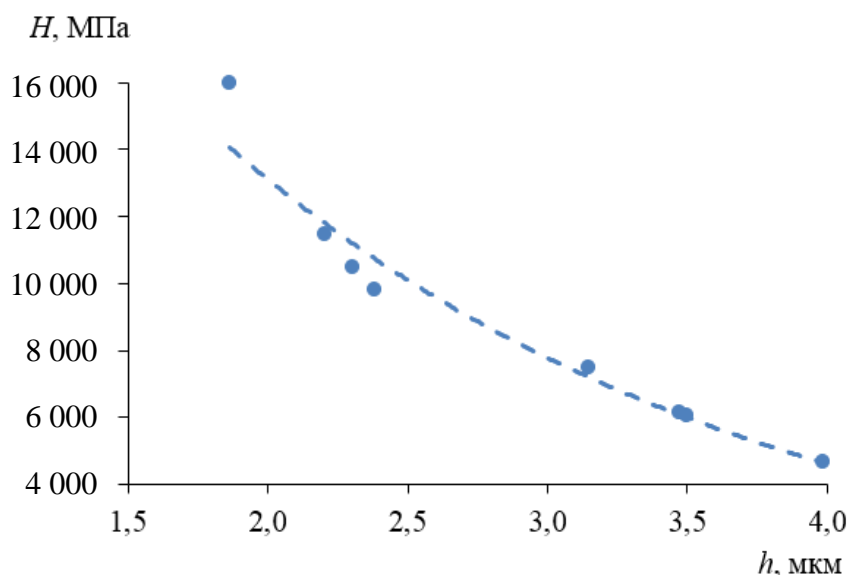


Рис. 1. Зависимость микротвердости стали Р6М5 после лазерной закалки от глубины внедрения индентора

Характерный вид зависимости величины линейного износа h от пути трения L , соответствующий уравнению (5), приведен на рис. 2. При расчетах приняты значения параметров, типичные для описываемых в данной статье экспериментов: $\alpha = 0,52 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; $k = 1,7 \cdot 10^5$; $A_n = 0,66 \text{ мм}^2$; $H_0 = 37\,000 \text{ МПа}$; $N = 0,5 \text{ Н}$.

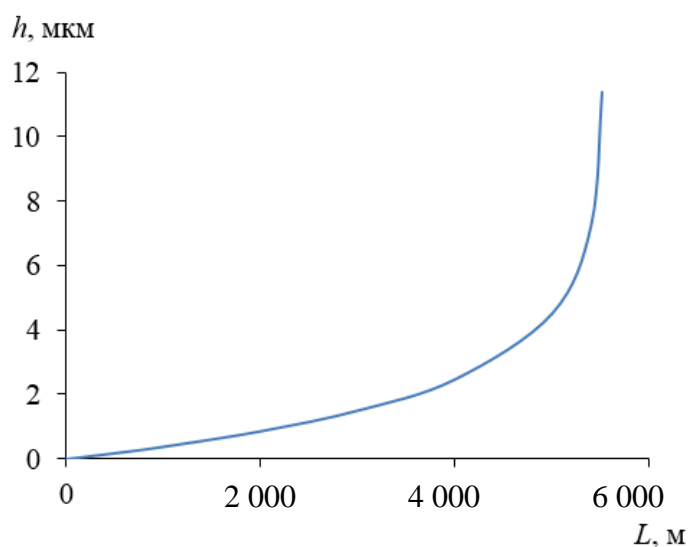


Рис. 2. Пример зависимости величины линейного износа от пути трения

Из уравнения (5) легко получить выражение для расчета коэффициента изнашивания k на основе экспериментальных данных:

$$k = \frac{A_n H_0}{\alpha NL} (1 - e^{-\alpha h}). \quad (6)$$

В случае постоянной по глубине твердости ($\alpha \rightarrow 0$) расчетная формула для величины k приобретает вид, непосредственно вытекающий из уравнения (1):

$$k \approx \frac{A_n h H}{NL}. \quad (7)$$

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены исследования износостойкости образцов из сталей Р6М5 и 30ХГСА после лазерной закалки с оплавлением поверхности.

Заготовки из конструкционной стали 30ХГСА предварительно подвергали объемной закалке с температурой нагрева 880 °С, охлаждению в масле и отпуску при температуре 200 °С с охлаждением на воздухе. Лазерную закалку выполняли посредством непрерывного излучения многоканального (48 лучей) СО₂-лазера на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5 на различных режимах (таблица). Характеристикой энергетического воздействия лазерного излучения служит параметр $w = W/(D \cdot v_{л})$ – плотность энергии лазерного излучения, где W – мощность лазерного излучения; D – диаметр лазерного пучка; $v_{л}$ – скорость движения лазерного луча по обрабатываемой поверхности. Параметр $\tau = D/v_{л}$ характеризует время экспозиции при лазерной закалке.

Параметры лазерной закалки стальных образцов

| Марка стали | W , кВт | $v_{л}$, мм/с | D , мм | w , Дж/мм ² | τ , с |
|-------------|-----------|----------------|----------|--------------------------|------------|
| 30ХГСА | 3,2 | 30 | 6 | 17,8 | 0,20 |
| | 2,2 | 10 | 6 | 36,7 | 0,60 |
| Р6М5 | 2,4 | 25 | 6 | 16,0 | 0,24 |
| | 2,0 | 15 | 6 | 22,2 | 0,40 |
| | 2,4 | 15 | 6 | 26,7 | 0,40 |

Заготовки из быстрорежущей стали марки Р6М5 после объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре 560 °С обрабатывались непрерывным лазерным излучением на автоматизированном лазерном комплексе АЛТКУ-3 на различных режимах (см. таблицу).

Анализ макро- и микроструктуры, измерение микротвердости исследованных стальных образцов в зоне упрочнения выполняли по поперечным металлографическим шлифам [4, 5]. Глубина упрочненного слоя образцов составила 0,5...1 мм.

Твердость стальных образцов определяли вдавливанием алмазного индентора в виде пирамиды или конуса. Нагрузка на индентор создавалась гириями (в первом случае массой 150 и 200 г, во втором – 2 и 3 кг). Величину твердости H определяли как отношение нормальной нагрузки на индентор к площади отпечатка [6]. Глубина внедрения инденторов оставляла в первом случае не более 4 мкм (микротвердость), во втором – не более 50 мкм (мезотвердость).

Испытание на изнашивание стальных образцов проводили о закрепленный абразив по схеме «шар – плоскость». В качестве контробразца использовали сферический наконечник с алмазным напылением (размер алмазного зерна – 50...100 мкм). К контакту прикладывали нормальную нагрузку $N = 0,49$ Н. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца перпендикулярно дорожке лазерного упрочнения осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой 20 Гц. Образцы подвергались испытанию в течение 5,5...10 ч, путь трения составил 4 750...8 600 м. После испытаний записывали профилограммы канавки изнашивания, по которым определяли ее геометрические размеры для расчета объемной интенсивности изнашивания $I_V = V/L$, где V – объемный износ (объем удаленного материала).

Глубина канавки изнашивания составляла порядка 16...32 мкм, на этом уровне коэффициент α в формуле (3) достаточно мал ($\alpha \approx 0,024$), поэтому коэффициент изнашивания k рассчитывали по формуле (7) с использованием среднего значения мезотвердости.

Кроме коэффициента изнашивания k , в качестве характеристики износостойкости рассчитывали удельную работу разрушения материала при изнашивании:

$$A = f \cdot N \cdot L / V = f \cdot N / I_V,$$

где f – коэффициент трения.

Для определения коэффициента трения f стальных образцов был использован микротрибометр [7]. Измерения проводились по схеме «шар – плоскость», плоский образец был изготовлен из исследуемого материала, сферический контрообразец – из стали ШХ15.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фрикционные характеристики образцов из быстрорежущей стали Р6М5 представлены на рис. 3 в зависимости от плотности энергии лазерного излучения. Величина коэффициента трения типична для условий граничного трения без специальных методов очистки трущихся поверхностей. Лазерная обработка снижает коэффициент трения примерно на 20...30 % (рис. 3а).

Сравнение графиков рис. 3б и 3г показывает, что удельная работа разрушения материала при изнашивании адекватно характеризует износостойкость материала: чем выше величина удельной работы разрушения, тем меньше объемная интенсивность изнашивания (выше износостойкость). Величина коэффициента изнашивания k

(рис. 3в) для стали Р6М5 несколько ниже типичных значений для инструментальных сталей [1].

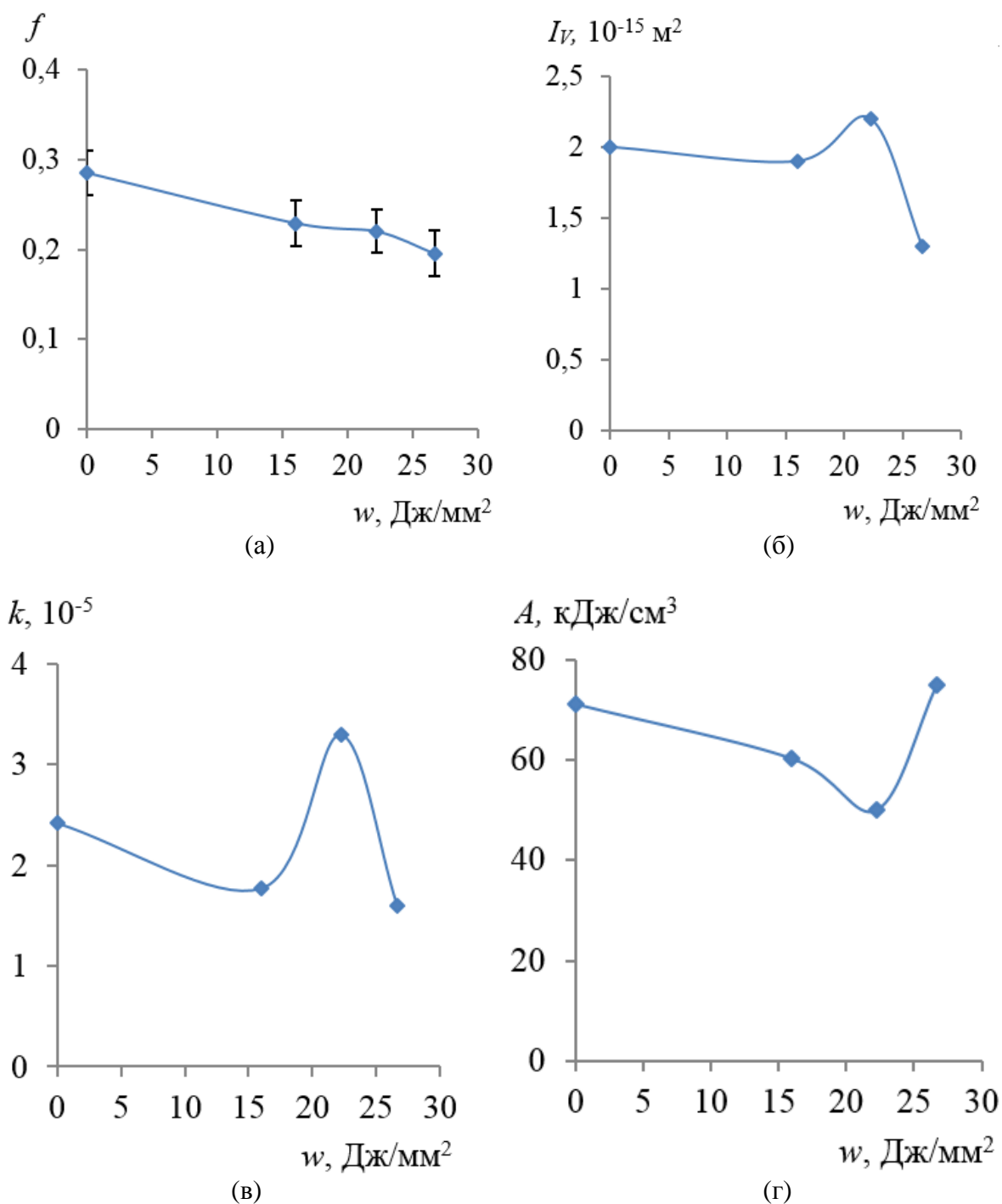


Рис. 3. Характеристики износостойкости образцов из стали Р6М5 в зависимости от плотности энергии лазерного излучения: коэффициент трения (а); объемная интенсивность изнашивания (б); коэффициент изнашивания (в); удельная работа разрушения при изнашивании (г)

Некоторые фрикционные характеристики стали 30ХГСА приведены на рис. 4. Износостойкость стали данной марки несколько меньше, чем инструментальной быстрорежущей стали Р6М5. Лазерное воздействие повышает износостойкость стали данной марки примерно на 20...30 %. Величина коэффициента изнашивания k практически не зависит от плотности энергии лазерного воздействия и несколько выше характерного значения для легированных сталей [1].

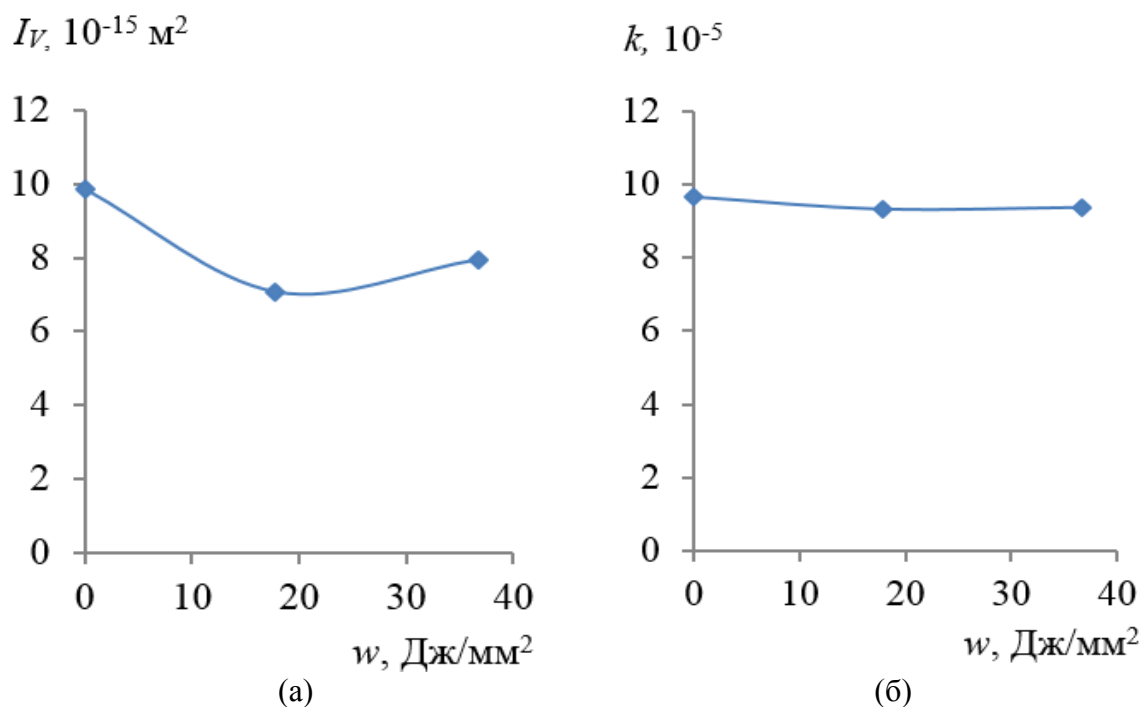


Рис. 4. Характеристики износостойкости образцов из стали 30ХГСА в зависимости от плотности энергии лазерного излучения: объемная интенсивность изнашивания (а); коэффициент изнашивания (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термообработка деталей машин и механизмов широко применяется для получения поверхностей с необходимыми эксплуатационными свойствами, в том числе триботехническими. К числу подобных технологических процессов относится лазерное поверхностное упрочнение. Особенности лазерного воздействия на материал обрабатываемой поверхности часто создают значительный градиент механических свойств по глубине. Как показано в статье, это приводит к увеличению скорости изнашивания в процессе трения. Данное обстоятельство необходимо учитывать при экспериментальном определении характеристик износостойкости материалов трущихся пар. Показано, что известное уравнение изнашивания Хольма – Арчарда применимо и в случае изнашивания деталей с градиентом твердости по глубине. Получена формула для расчета коэффициента изнашивания в подобных условиях.

По имеющимся теоретическим зависимостям экспериментальным путем определены характеристики износостойкости образцов из двух марок сталей после лазерного поверхностного упрочнения: коэффициент изнашивания и удельная энергия разрушения материала при изнашивании. Продемонстрировано, что лазерное

воздействие снижает коэффициент трения и повышает износостойкость поверхностей образцов из быстрорежущей стали на 20...30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
2. Stolarsky T.A. Tribology in Machine Design. Oxford e.a.: Butterworth-Heinemann. 1990. 300 p.
3. Williams J. Engineering Tribology. Cambridge e.a.: Cambridge University Press. 2005. 488 p.
4. 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.
5. Афанасьева Л.Е. Формирование структуры и свойств быстрорежущей стали при лазерном упрочнении // *Вестник ТвГУ. Серия «Физика»*. 2015. № 1. С. 5–20.
6. ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ. 2013. 24 с.
7. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А.; Заявл. 25.12.1998. Оpubл. 10.06.2000. Бюл. № 16.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О характеристиках изнашивания стальных поверхностей, упрочненных лазерным излучением // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 38–46.

ON WEAR CHARACTERISTICS OF STEEL SURFACES HARDENED BY LASER RADIATION

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 results of studies of the characteristics of abrasive wear resistance of steel specimens hardened by laser hardening in the course of continuous radiation from a multichannel CO₂ laser are presented. It is shown that the gradient of mechanical properties in depth, which is the result of laser action on the material, can lead to an increase in the wear rate during friction. This circumstance has to be taken into account in the experimental determination of the wear resistance characteristics of materials in rubbing pairs. It is shown that the well-known Holm – Archard wear equation is also applicable in the case of wear of parts with a hardness gradient in depth. A formula is obtained for calculating the wear coefficient in such conditions. Based on the obtained theoretical dependences, the wear resistance characteristics of specimens made of two grades of steel (R6M5 and 30KhGSA) after laser surface hardening were experimentally determined: the wear coefficient and the specific energy of destruction of the material during wear. It is shown that laser action reduces

the coefficient of friction and increases the wear resistance of specimen surfaces made of high-speed steel by 20...30 %.

Keywords: laser hardening; constructional steel; high speed steel, abrasive wear resistance, wear coefficient.

REFERENCES

1. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. *Treniye, smazka, iznos* [Friction, lubrication, wear]. Moscow: Fizmatlit. 2007. 368 p.
2. Stolarsky T.A. *Tribology in Machine Design*. Oxford e.a.: Butterworth-Heineman. 1990. 300 p.
3. Williams J. *Engineering Tribology*. Cambridge e.a.: Cambridge University Press. 2005. 488 p.
4. Afanas'eva L.E., Novoselova M.V., Barabonova I.A., Ratkevich G.V. Influence of laser hardening on the microstructure and abrasive wear resistance of 30KhGSA steel. *Metally*. 2020. No. 1, pp. 54–58. (In Russian).
5. Afanas'eva L.E. Formation of the structure and properties of high-speed steel during laser hardening. *Vestnik TvGU. Seriya «Fizika»*. 2015. No. 1, pp. 5–20. (In Russian).
6. GOST R 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002). *Metally i splavy. Izmereniye tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumentalnom indentirovanii. Chast 1. Metod ispytaniy*. [Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials during instrumental indentation. Part 1. Test method]. Moscow: Standartinform. 2013. 24 p. (In Russian).
7. Patent RF 2150688. *Sposob opredeleniya koeffitsiyenta treniya pokoya poverkhnostnykh sloyev materiala* [Method of determining the coefficient of friction at rest of the surface layers of the material]. Izmailov V.V., Gusev A.F., Nesterova I.N., Ivanova A.A. Declared 25.12.1998. Published 10.06.2000. Bulletin No. 16.

Поступила в редакцию/received: 06.03.2022; после рецензирования/revised: 22.03.2022;
принята/accepted: 31.03.2022