

УДК 621.983.073.048.7:621.373.826.11

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Е. Э. ФЕЛЬДШТЕЙН<sup>а+</sup>, М. А. КАРДАПОЛОВА<sup>б</sup>, Р. ГАЙДА<sup>а</sup>, Б. ХОРОДЫСКИ<sup>а</sup>,  
О. В. КАВАЛЬЧУК<sup>б</sup>

Рассмотрены трибологические характеристики покрытий на базе мелкозернистого твёрдого сплава ВК6-М, хрома и молибдена, нанесённых электроискровой обработкой и с дополнительным лазерным упрочнением. Электроискровая обработка не оказывает влияния на коэффициенты трения и температуру в зоне трения поверхностей с покрытиями по сравнению с условиями трения на поверхности стали 45. Дополнительное лазерное упрочнение снижает рассеивание коэффициентов трения и температур, практически не влияя на их уровень. Интенсивность изнашивания покрытий возрастает в направлении ВК6-М → Ст → Мо → сталь 45. Наиболее эффективно покрытие из твёрдого сплава, обеспечивающее снижение интенсивности изнашивания в среднем в 15 раз по сравнению со сталью 45. Интенсивность изнашивания покрытий на базе хрома и молибдена ниже в 1,7 и 1,4 раза по сравнению со сталью 45. Лазерное упрочнение приводит к дальнейшему снижению интенсивности изнашивания для покрытий на базе твёрдого сплава на 70%, а для покрытий на базе хрома и молибдена — соответственно в 3,5 и 3 раза.

**Ключевые слова:** покрытие, электроискровое легирование, лазерное упрочнение, трение, износ.

**Введение.** В процессе обработки деталей машиностроения широко используются различные методы термического и термохимического упрочнения рабочих поверхностей, в том числе процессы нанесения покрытий методами вакуумного химического и физического осаждения из газовой фазы (*англ.* CVD и PVD) или нанесения гальванических покрытий. Такие покрытия характеризуются повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью и обеспечивают продление срока службы детали. Однако при использовании первой группы методов требуется дорогостоящее оборудование и достаточно длительное время. Использование технологий второй группы, со своей стороны, требует серьёзных мероприятий, связанных с обеспечением охраны труда и предотвращением загрязнения окружающей среды. Разрешить указанные проблемы позволяет электроискровое легирование (ЭИЛ). Verbitchi и др. отмечают, [1] что этот технологический процесс позволяет наносить покрытия толщиной 0,01–0,5 мм или дополнительные слои материала толщиной 0,5–3 мм для улучшения функциональных свойств или при восстановлении изношенных деталей.

Как указывает Лазаренко [2], в ходе ЭИЛ при сближении электродов увеличивается напряжённость электрического поля и на некотором расстоянии между ними происходит электрический разряд. Пучок электронов ударяется о твёрдую металлическую поверхность анода. Энергия движения остановленных электронов выделяется в поверхностных слоях анода. Плотность тока превосходит критические значения и от анода отделяется капля расплавленного металла, которая движется к катоду. Летящая капля, нагреваясь до высокой температуры, закипает и взрывается, цепь тока прерывается. Расплавленные частицы, достигнув катода, свариваются с ним и частично внедряются в его поверхность, и через них проходит второй импульс тока, сопровождающийся механическим ударом. Поверхность контакта подвергается локальному воздействию высоких давлений  $(2-7) \cdot 10^3$  ГПа и высоких температур, до  $(5-40) \cdot 10^3$  К [1], значительно превосходящих темпе-

а Зеленогурский университет. Польша, 65-516, г. Зелена Гура, ул. проф. З. Шафрана, 4.

б Белорусский Национальный Технический Университет. Беларусь, 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: E.Feldsztein@ibem.uz.zgora.pl.

ратуру кипения контактирующих материалов. Фактически процесс ЭИЛ можно рассматривать как микросварку с частотой импульсов 0,2–2 кГц. При этом только около 1% от общего количества выделенной теплоты вызывает разогрев поверхностных слоёв детали с покрытием, а оставшиеся 99% без отрицательных последствий отводятся в глубину основного материала детали. В результате имеет место только местное оплавление нанесённого слоя покрытия, никаких преобразований и искажений структуры основного металла или тепловых деформаций детали не наблюдается. Однако в самом покрытии формируются крайне неравновесные структуры с очень мелкими зёрнами и высокой неоднородностью состава и свойств.

Согласно [1–6] ЭИЛ применяется, в частности, для:

- нанесения износостойких покрытий на поверхности литейных форм, стоматологических имплантов и на режущие инструменты;
- нанесения защитных покрытий на гребные винты кораблей, детали системы подачи топлива и выхлопной системы двигателей внутреннего сгорания;
- изготовления специальных пар трения скольжения;
- модификации поверхностей трения;
- ремонта изношенных матриц и пуансонов, используемых при обработке давлением;
- ремонта литейных форм;
- ликвидации сварочных дефектов и др.

В [6] указывается, что наряду с возможностью формирования широкого диапазона покрытий ЭИЛ характеризуется также рядом дополнительных достоинств, определяющих его успешное использование для решения производственных проблем:

- возможность формирования покрытий на детали в строго указанных местах радиусом от долей миллиметра и более без защиты остальных поверхностей;
- возможность применения в качестве электродов большинства токопроводящих материалов, как чистых металлов, так и их сплавов, композиций;
- сравнительная простота технологии, не требующей специальной предварительной обработки поверхности;
- высокая надёжность оборудования и простота его обслуживания, малые габариты, высокая ремонтпригодность;
- низкая энергоёмкость процесса (0,3–2,0 кВт);
- высокий коэффициент переноса электродного материала (60–80%).

Вместе с тем ЭИЛ имеет также недостатки — высокая шероховатость поверхностей после обработки, малая глубина нанесённого слоя (30–50 мкм), многочисленные дефекты в нанесённом слое. Как показано в [7–13] эти недостатки могут быть легко устранены при использовании лазерного упрочнения.

**Цель исследований.** Оценка влияния электроискрового легирования с последующим лазерным упрочнением на трибологические свойства нанесённых покрытий.

**Методика исследований.** В качестве электродов использовались: мелкозернистый твёрдый сплав ВК6-М (средний размер зёрен карбидной фазы 1,6 мкм [14]), а также проволоки из хрома и молибдена. Покрытия наносились на образцы (колодки) из стали 45 на установке “Элитрон-22А” при режиме: рабочий ток  $1,8 \pm 0,54$  А, напряжение импульса 60 В, частота импульсов 100 Гц. Толщина нанесённых покрытий 70–80 мкм. Последующее упрочнение покрытий осуществлялось в условиях непрерывного лазерного облучения при использовании газового лазера “Комета-2”. Параметры облучения: мощность излучения 0,9 кВт, скорость движения лазерного луча 900 мм/мин, диаметр луча в месте соприкосновения с поверхностью образца 4 мм, расстояния между средними линиями лазерных дорожек 3 мм. Поскольку диаметр луча превышает расстояние между средними линиями дорожек, имеет место двукратное воздействие лазерного луча на часть упрочняемой поверхности.

Для сравнения проведены также испытания образцов из стали 45 с твёрдостью НВ 220–227.

Трибологические исследования выполнялись на машине трения А-135 типа Amsler при использовании схемы “ролик — колодка” в соответствии со стандартом [15]. Ролики (контртела) выполнялись из стали 45, закалённой до твёрдости 45–48 НРС. Повышенная твёрдость позволила

существенно сократить время испытаний. С целью ликвидации влияния рассеивания твёрдости на полученные результаты, твёрдость роликов в конкретных испытаниях принималась случайным образом, а далее выполнялась статистическая оценка полученных данных по методике [16]. На первом этапе рассчитывался коэффициент Кохрена, что позволило подтвердить принадлежность исследуемых случайных выборок к одной генеральной совокупности. После этого анализировались значения средних величин исследуемых параметров для различных условий испытаний, что позволило статистически обоснованно определить различие или подобие между исследованными трибологическими характеристиками.

Испытания проводились при скорости скольжения 0,45 м/с и силе нагружения 500 Н в условиях концентрированного контакта. Время испытаний — 1 ч. В качестве смазочного материала использовалось минеральное машинное масло L-AN 68 (аналог масла И-40А ГОСТ 20799-88), расход масла 30 капель/мин.

Средний коэффициент трения рассчитывался как

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{1000A}{\pi P D_0 n}, \quad (1)$$

где  $A$  — работа трения, Н·м;  $P$  — сила нагружения, Н;  $D_0$  — диаметр ролика, мм;  $n$  — число оборотов.

Мгновенный коэффициент трения рассчитывался как

$$\mu = \frac{2M_{\tau}}{P D_0}, \quad (2)$$

где  $M_{\tau}$  — момент трения, Н·м;  $D_0$  — диаметр ролика, мм.

Объёмный износ колодки определялся по формуле:

$$I_V = \frac{D_0^2 l}{8} \left\{ 2 \arcsin \left( \frac{b}{D_0} \right) - \sin \left[ 2 \arcsin \left( \frac{b}{D_0} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $D_0$  — диаметр ролика;  $l$  — ширина колодки;  $b$  — средняя ширина площадки износа колодки.

Интенсивность объёмного изнашивания рассчитывалась как

$$I_{V_0} = \frac{I_V}{\tau}, \quad (4)$$

где  $\tau$  — время трения

Ширина поверхности износа колодки измерялась на микроскопе с точностью 0,01 мм.

**Результаты исследований.** Установлено, что мгновенный коэффициент трения для всех покрытий стабилизируется уже после 1–3 мин работы (рис. 1). Коэффициенты трения покрытий практически одинаковы по сравнению с коэффициентом трения стали 45. Дополнительное лазерное упрочнение стабилизирует колебания мгновенных коэффициентов трения и незначительно увеличивает их значения.

Средние коэффициенты трения покрытий практически одинаковы по сравнению с коэффициентом трения стали 45 (рис. 2). Это может свидетельствовать о близком характере процессов взаимодействия материалов различных покрытий с материалом контртела. Дополнительное лазерное упрочнение практически не оказывает влияния на величины коэффициента трения. Наименьшее рассеивание значений наблюдается для покрытия на базе твёрдого сплава ВК6-М, что может свидетельствовать о более однородной структуре сформированного покрытия. Указанные обстоятельства позволяют предположить, что применение покрытий, нанесённых методом ЭИЛ, не требует дополнительной энергии на преодоление повышенного трения на поверхностях контакта.

Стабилизация температуры в зоне трения происходит после 30 мин в случае ЭИЛ и после 20 мин в случае использования дополнительного лазерного упрочнения (рис. 3). При использовании ЭИЛ для нанесения покрытий на базе хрома и мелкозернистого твёрдого сплава температуры

в зоне трения выше по сравнению со сталью 45, а для покрытий на базе молибдена — ниже, что вероятно связано с различиями в теплопроводности систем “основной материал — покрытие”. Лазерное упрочнение обеспечивает практически равные температуры для всех исследованных покрытий.

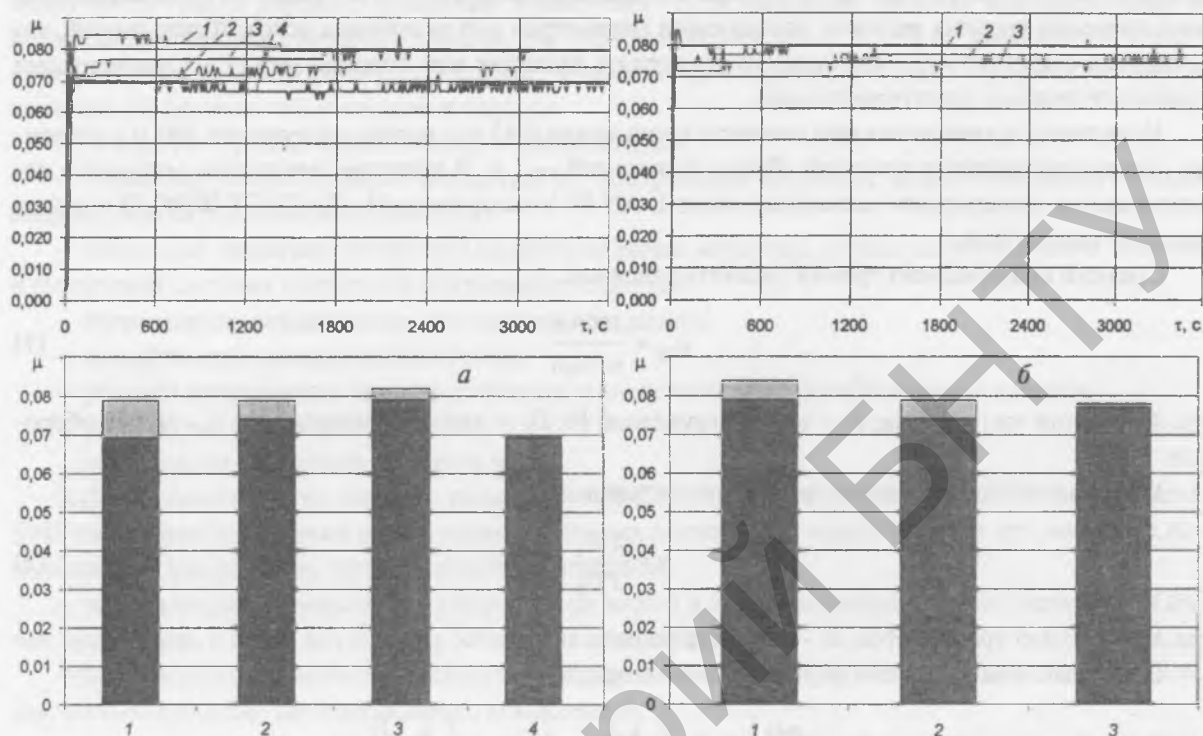


Рис. 1. Изменения во времени и рассеивание значений мгновенных коэффициентов трения покрытий: а — после ЭИЛ; б — после ЭИЛ с последующим лазерным упрочнением; 1 — ВК-6М; 2 — Cr; 3 — Mo; 4 — сталь 45

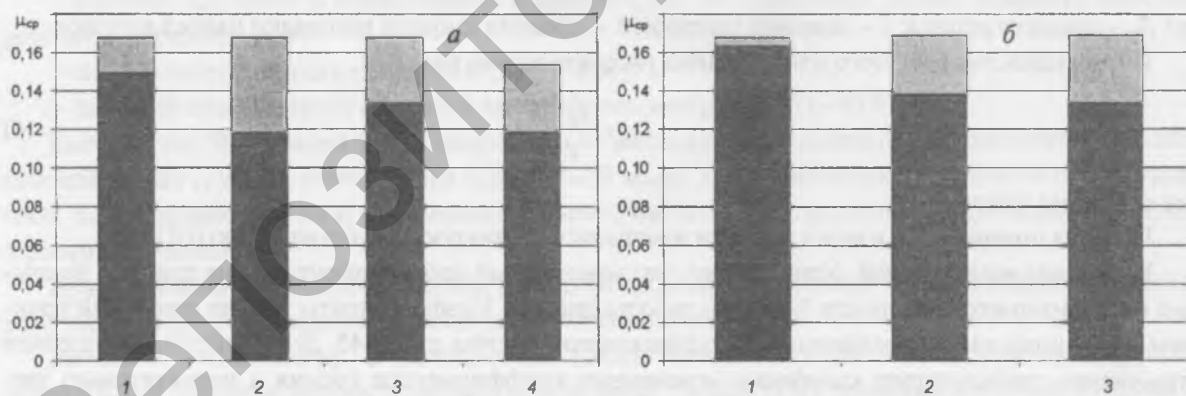


Рис. 2. Средние коэффициенты трения покрытий. Обозначения см. рис. 1

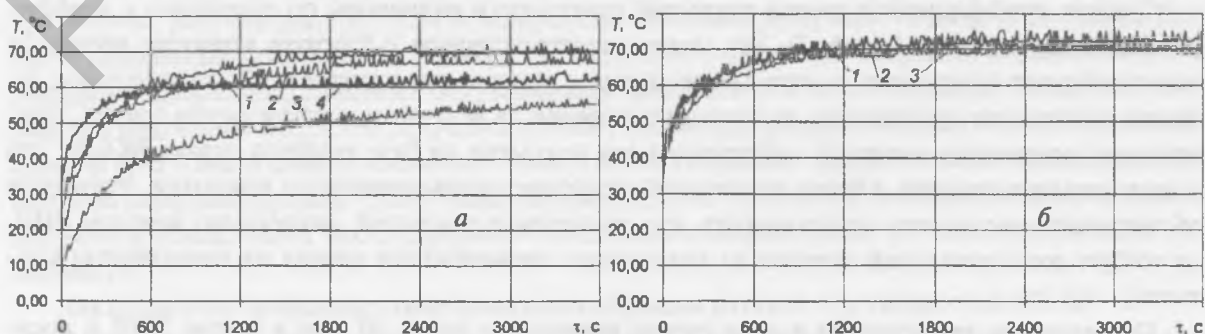


Рис. 3. Изменения во времени температуры в зоне трения. Обозначения см. рис. 1

Интенсивность изнашивания покрытий возрастает в направлении ВК6-М → Cr → Mo → сталь 45 (рис. 4). Наиболее эффективно покрытие из мелкозернистого твёрдого сплава, обеспечивающее снижение интенсивности изнашивания трущихся поверхностей в среднем в 15 раз по сравнению со сталью 45. Интенсивность изнашивания покрытий на базе хрома и молибдена ниже в 1,7 и 1,4 раза по сравнению со сталью 45. Интенсивность изнашивания каждого из покрытий снижается в случае использования дополнительного лазерного упрочнения. Для твёрдого сплава ВК6-М это снижение составляет 70%, а для покрытий на базе хрома и молибдена — соответственно 3,5 и 3 раза.

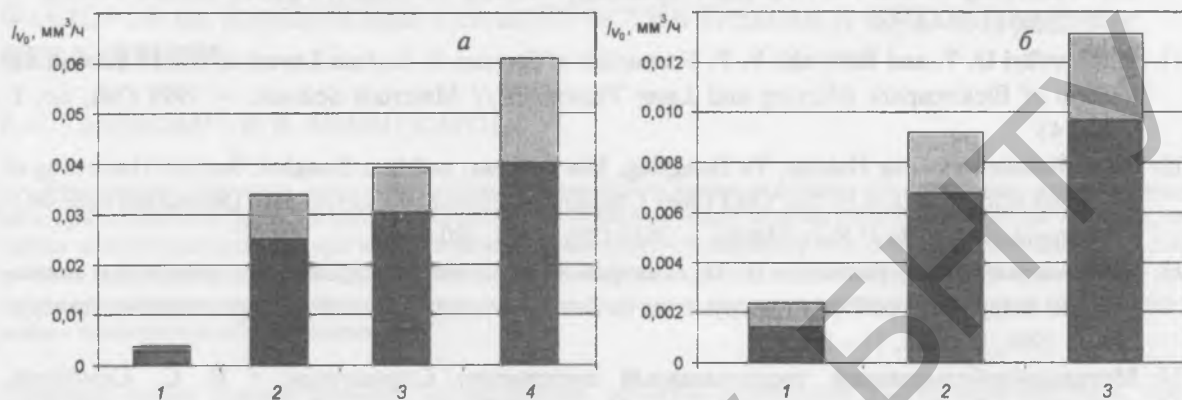


Рис. 4. Интенсивность объёмного изнашивания покрытий. Обозначения см. рис. 1

**Выводы.** Использование ЭИЛ для нанесения покрытий на базе мелкозернистого твёрдого сплава, хрома или молибдена на поверхности трения не вызывает существенных различий в коэффициентах трения и температурах в зоне трения поверхностей с покрытиями по сравнению с трением стали 45. Дополнительное лазерное упрочнение снижает рассеивание коэффициентов трения и температур, практически не влияя на их уровень. Интенсивность изнашивания трущихся поверхностей возрастает в направлении ВК6-М → Cr → Mo → сталь 45. Наиболее эффективно покрытие из твёрдого сплава, обеспечивающее снижение интенсивности изнашивания в среднем в 15 раз по сравнению со сталью 45. Интенсивность изнашивания покрытий на базе хрома и молибдена ниже в 1,7 и 1,4 раза по сравнению со сталью 45. Лазерное упрочнение приводит к дальнейшему снижению интенсивности изнашивания. Для твёрдого сплава ВК6-М это снижение составляет 70%, а для покрытий на базе хрома и молибдена — соответственно 3,5 и 3 раза.

#### Обозначения

$\mu_{\text{ср}}$  — средний коэффициент трения;  $\mu$  — мгновенный коэффициент трения;  $A$  — работа трения;  $P$  — сила нагружения;  $D$  — диаметр ролика;  $n$  — число оборотов;  $M_t$  — момент трения;  $I_v$  — объёмный износ колодки;  $I_{v_s}$  — интенсивность объёмного изнашивания;  $l$  — ширина колодки;  $b$  — средняя ширина поверхности износа колодки;  $\tau$  — время трения.

#### Литература

1. Verbitchi V., Ciuca C., and Cojocaru R. Electro-Spark Coating With Special Materials // Non-conventional Technologies Review. — 2011, no. 1, 57–62
2. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: АН СССР. — 1959
3. Radek N. Obróbka Elektroiskrowa — Urządzenia i Zastosowania Przemysłowe // Mechanik. — 2008, no. 7, 600–602
4. Radek N. Własności Precyzyjnych Warstw Powierzchniowych Wytworzonych Technologia Elektroiskrowa // Tribologia. Teoria i Praktyka. — 2010, no. 5, 181–190
5. Гитлевич Ф. У., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Под ред. Ю. Н. Петрова. — Кишинёв: Штиинца. — 1985

6. **Иванов В. И., Бурумкулов Ф. Х.** Электроискровое легирование // [www.rscstanki.ru/articles//46](http://www.rscstanki.ru/articles//46)
7. **Radek N. and Bartkowiak K.** Performance Properties of Electro-Spark Deposited Carbide-Ceramic Coatings Modified by Laser Beam // *Physics Procedia*. — 2010, no. 5, 417–423
8. **Radek N. and Kamiński J.** Formation of Cu-Mo Anti-Wear Coatings and Their Tribological Properties Before and After Laser Treatment // *Tribologia. Teoria i Praktyka*. — 2010, no. 5, 191–200
9. **Radek N.** Experimental Investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti Electro-Spark Coatings Modified by Laser Beam // *Advances in Manufacturing Science and Technology*. — 2008 (32), no. 2, 53–68
10. **Xie Yu-jiang, Wang Mao-cai, and Huang Da-wei.** Comparative Study of Microstructural Characteristics of Electrosark and Nd:YAG Laser Epitaxially Growing Coatings // *Applied Surface Science*. — 2007 (253), 6149–6156
11. **Paustovs'kyi O. V. and Botvynko V. P.** Formation of Stresses in Surface Layers of R6M5 Steel in the Process of Elektrosark Alloying and Laser Treatment // *Materials Science*. — 1998 (34), no. 1, 141–143
12. **Wang Jiansheng, Meng Huimin, Yu Hongying, Fan Zishuan, and Sun Dongbai.** Surface Hardening of Fe-Based Alloy Powders by Nd:YAG Laser Cladding Followed by Electrosark Deposition with WC-Co Cemented Carbide // *Rare Metals*. — 2010 (29), no. 4, 380–384
13. **Ковальченко М. С., Ботвинко В. П., Тамаров А. П.** Электроискровое легирование и последующая лазерная обработка инструмента из быстрорежущих сталей // *Порошковая металлургия*. — 1996, № 5–6, 11–15
14. **Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: Справочник** / В. С. Самойлов, Э. Ф. Эйманс, В. А. Фальковский и др.; Редкол.: И. А. Ординарцев (пред.) и др. — М.: Машиностроение. — 1988
15. **PN-82/H-04332.** Badania Zużycia Metali lub ich Warstw Dyfuzyjnych w Procesie Tarcia Ślizgowego przy Stałym Nacisku na Maszynie Amslera
16. **Ящерицын П. И., Махаринский Е. И.** Планирование эксперимента в машиностроении. Мн.: Вышэйшая школа. — 1985

*Поступила в редакцию 12.11.12.*

Feldshtein E. E., Kardapolova M. A., Gajda R., Horodyski B., and Kavalchuk O. V. **Tribological Properties of Electro-Spark Deposited Coatings Hardened by Laser Treatment.**

The tribological properties of the coatings based on fine-grained VK6-M hard alloy, chromium, and molybdenum have been investigated. The coatings were obtained by the electrosark deposition followed by the laser treatment. The electric spark deposition does not affect the coefficient of friction and temperature in the friction zone of the coated surface in contrast to steel 45 surface. Additional laser treatment reduces the dispersion of the friction coefficients and temperatures, but hardly alters their level. The wear rate of the coatings increases in the direction VK6-M → Cr → Mo → steel 45. A hard alloy coating is most effective, since the wear rate decreases as much as 15 times compared to steel 45. The wear rate of the coatings based on chromium and molybdenum is 1.7 and 1.4 times lower than that of steel 45. The laser treatment reduces the wear rate even more, i. e., by 70% for the coating based on the hard alloy and 3.5 and 3 times, respectively, for coatings based on chromium and molybdenum.

**Keywords:** coating, electro-sark deposited, laser treatment, friction, wear.