

## ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Ф.Х. БУРУМКУЛОВ, д-р техн. наук, С.А. ВЕЛИЧКО, В.И. ИВАНОВ, кандидаты техн. наук, ГОСНИТИ, П.А. ИОНОВ, канд. техн. наук, М.А. ОКИН, А.В. СТОЛЯРОВ, инженеры, Мордовский госуниверситет

Нанокompозитные покрытия на поверхностях деталей и инструментов, нанесенные электроискровым методом в газовой среде (ЭИО) стержневыми электродами, существенно влияют на износостойкость соединений [1].

Исследования микроструктуры и фазового состава поверхности после ЭИО показали, что вне зависимости от режимов обработки, материалов электрода и детали на рабочих поверхностях детали появляется измененный слой, состоящий из четырех зон.

Верхняя (первая) зона – тонкий слой, по свойствам близкая к покрытиям, образованным газотермическими методами. Под верхним слоем находится белый, нанокompозитный слой (БС), под ним – диффузионная (серая) зона, за которой следует зона термического влияния (подслой).

Диффузионную зону и зону термического влияния часто объединяют под общим названием «термодиффузионная зона» или «переходной слой», который представляет собой область диффузионного проникновения элементов материала электрода и газовой среды в материал детали и термического воздействия искровых разрядов.

По И.В. Крагельскому, интенсивность изнашивания при упругом контакте соединения (рабочей поверхности) приближенно находится из уравнения [2]:

$$I = C_1 q_c \left[ \frac{K f q_c}{C_2 \sigma_T} \left( \frac{E}{(1-\mu) q_c} \right)^{1-\beta} \right]^{t_y}, \quad (1)$$

где  $C_1, C_2, K, \beta$  – коэффициенты;  $f$  – коэффициент трения;  $q_c$  – контурное давление;  $\sigma_T$  – предел текучести наплавленных материалов или более мягкого материала;  $E$  – модуль упругости наплавленных материалов;  $t_y$  – параметр фрикционной усталости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Согласно молекулярно-механической теории трения коэффициент трения при упругом контакте

$$f = \left( C_2 \tau_{адг} / E^{2\nu+1} q_c^{2\nu+1} \right) \left( R_z / r b^\nu \right), \quad (2)$$

где  $\tau_{адг}$  – прочность адгезионной связи на сдвиг при нулевой нагрузке;  $R_z$  и  $r$  – высота неровностей профиля по десяти точкам и средний радиус вершин неровностей;  $\nu$  и  $b$  – эмпирические параметры, характеризующие шероховатость поверхностей.

Из сравнения формул (1) и (2) следует, что интенсивность изнашивания поверхности находится в сложной зависимости от физико-механических и геометрических свойств покрытия.

Хотя природа трения и износа одина, их значения определяют различными факторами. Коэф-

фициент трения определяют величина и распределение напряжений по границе контакта, а износ – деформации, возникающие в приконтактном слое материала и его сопротивлении усталости, которые существенно зависят от величин и знака остаточных напряжений.

Действие остаточных напряжений подобно влиянию средних (постоянных) напряжений на усталостную прочность деталей.

Сжимающие остаточные напряжения повышают усталостную прочность деталей до 50 %, а в случае присутствия растягивающих остаточных напряжений понижают до 30 %.

Для металлических крупнозернистых материалов, в том числе и в случае наноматериалов, влияние размера зерна на твердость (прочность) описывается соотношением Холла–Петча [3]:

$$H_v(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + k d^{-\frac{1}{2}},$$

где  $H_v$  – твердость;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $H_0$  – твердость тела зерна;  $\sigma_0$  – внутреннее напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $d$  – диаметр зерна.

Из формулы (1) следует, что при прочих равных условиях уменьшение зерна в 10 раз приводит к увеличению твердости и предела текучести покрытия в 3 раза.

Следовательно, главная роль в нанокompозитных материалах отводится размерам зерна и поверхностям раздела (границам зерен) как факторам, позволяющим существенно изменить свойства твердых тел. Достичь это можно путем модификации структуры, а также легированием химическими элементами независимо от размеров их атомов и типа химической связи.

Установлено [1, 4], что при прочих равных условиях существует достаточно тесная корреляционная связь между износостойкостью материалов (в широком диапазоне температур) и характеристиками прочности и упругости, которые, в свою очередь, зависят от остаточных напряжений. В то же время возникновение больших микронапряжений в структуре материала приводит к дроблению зерна, а следовательно, к увеличению дисперсности блоков зерна.

Высокие остаточные напряжения растяжения, возникающие на поверхностях легированного слоя, можно снять методами поверхностно-пластической деформации (ППД), ультразвукового выглаживания или лазерной обработкой. В условиях ремонтного предприятия наиболее технологичный метод – ППД шариком или роликом, а также алмазное выглаживание.

Проведены исследования физико-механических свойств покрытий рентгеновским методом. В качестве подложки выбрали поясок золотника гидрораспределителя Р-75/80, который представляет собой цилиндр диаметром 25 мм, выполненный из стали 20Х (HRC 56–63), на который наносили покрытия из стали марки 65Г.

Электроискровую обработку в атмосфере воздуха выполняли на установке «БИГ-3» на пятом энергетическом режиме (энергия разряда 1,66 Дж) в механизированном режиме со скоростью  $v$  продольной подачи электрода 0,08; 0,114; 0,193; 0,26 мм/об. (на 1 оборот шпинделя станка, здесь и далее мм/об.) при частоте вращения образца 11 мин<sup>-1</sup> и электрода 3000 мин<sup>-1</sup>.

Структурные изменения изучали рентгеновским методом с помощью дифрактометра ДРОН-6 в Си Ка дублетном излучении. Сканирование пошаговое, обработка рентгеновских спектров проведена с помощью стандартной программы PDWin 4.0 (разработчик НПО «Буревестник»).

Металлографические исследования проводили с использованием микроскопа МЕТАМ РВ-21 и микротвердомера «DURAMIN 5» на шлифах, подготовленных на станке МЕТКОН ГРИПО 2V.

Износостойкость покрытий определяли сравнением интенсивности изнашивания эталонных образцов, изготовленных из реальных золотников (сталь 20Х, HRC 56...63), с аналогичными образцами после нанесения слоя покрытия методом ЭИО. Пары трения «золотник – корпус» по схеме вращательного движения испытывали на машине СМТ-1 в условиях граничного трения по ГОСТ 23.224–86 с предварительным определением оптимальной нагрузки.

Для определения фазового состава покрытий сняли рентгенограммы в интервале двойного угла от 30 до 110°. Фазовый состав исследуемых покрытий соответствует фазе чистого  $\alpha$ -Fe с включениями оксидов железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, что подтверждается сравнением результатов наших экспериментов с данными таблиц ASTM [4].

Эксперимент показал, что полуширина рефлексов с повышением скорости подачи увеличивается (см. таблицу), что свидетельствует о большем разупорядочении структуры покрытий.

Скорость подачи, мм/об.	Полуширина рефлекса, град.	
	110	211
0,080	0,492	0,990
0,114	0,535	1,044
0,193	0,610	1,219
0,260	0,635	1,269

Уширение рефлексов связано с дефектами кристаллической структуры и возникновением микронапряжений в структуре материала либо с дисперсностью блоков.

Анализ рентгенограмм показал, что с увеличением скорости подачи средний размер блоков зерна уменьшается (рис. 1). Вероятно, данный эффект связан с уменьшением времени обработки образ-

ца, приходящегося на единицу площади поверхности (время теплового воздействия на формирующееся покрытие уменьшается и образование блоков замедляется).

В зоне контакта электрода с поверхностью обрабатываемой детали температура разряда достигает 10<sup>4</sup> К, а так как деталь достаточно массивная, то происходит быстрый отвод тепла от поверхности, следовательно имеет место локальное закаливание перенесенного вещества. Процесс нанесения покрытия приводит к разогреву всего образца. В дальнейшем он постепенно охлаждается до комнатной температуры и, следовательно, происходит отпуск материала покрытия.

Величина макронапряжений (остаточных напряжений) определена по методу  $\sin^2\psi$ . Основой метода является то, что межплоскостные расстояния атомных плоскостей  $d$  во всех кристаллитах изделия, идентично ориентированных по отношению к действующим упругим напряжениям, изменяются одинаково.

Предположим, что в образце реализуется плосконапряженное состояние. В этом случае деформация в направлении первичного пучка

$$\epsilon_{\varphi,\psi} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2),$$

где  $\sigma_{\varphi} = \sigma_1 \cos^2\varphi + \sigma_2 \sin^2\varphi$  – результирующая величина напряжений, выраженная через главные нормальные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в рассматриваемой плоскости.

Обработкой графиков зависимости  $\epsilon_{\varphi,\psi} = f(\sin^2\psi)$  определены значения  $\sigma_{\varphi}$  по тангенсу угла наклона полученной прямой, а затем значения макронапряжений в поверхностном слое покрытий, образованных при различных скоростях подачи (рис. 2).

Характер зависимости остаточных напряжений от скорости подачи – немонотонный, что свидетельствует о сложности процессов образования структуры в поверхностном слое. Можно предположить, что в формировании структуры участвуют два независимых процесса: первый – возникновение термонапряжений при нанесении покрытия и второй – проникновение дефектов и примесей из подложки в покрытие. Знак «минус» свидетельствует о сжимающем характере макронапряжений. Полученная

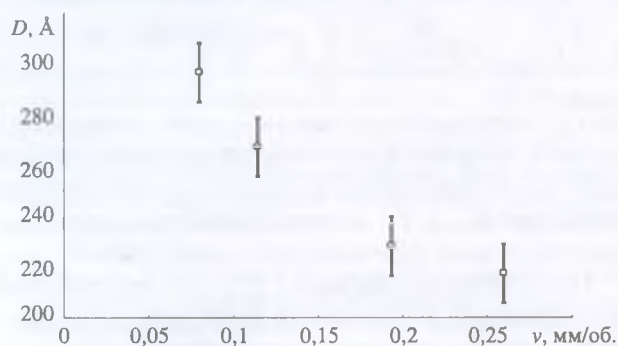


Рис. 1. Зависимость среднего размера  $D$  блоков материала покрытия, полученного обработкой электродом из стали 65Г, от скорости  $v$  подачи

## НАНОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

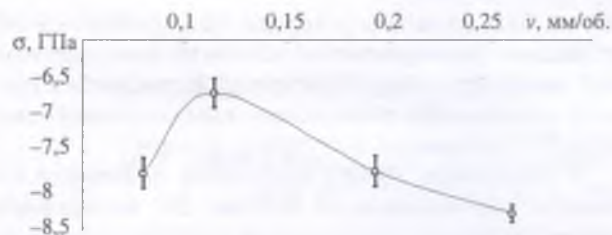


Рис. 2. Зависимость величины остаточных напряжений  $\sigma$  в поверхностном слое покрытия, образованного нанесением стали 65Г, от скорости  $v$  подачи

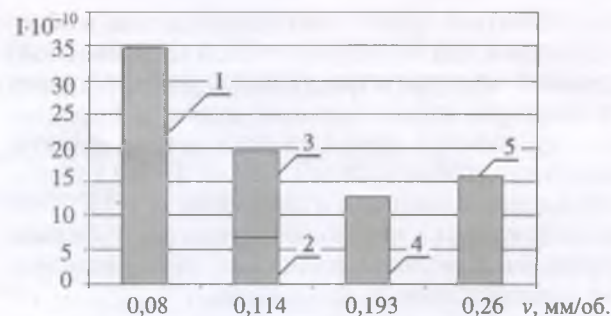


Рис. 3. Зависимость суммарной интенсивности  $I$  изнашивания для пар трения покрытие – колодка (1, 2, 4) и эталонной пары (5, 3) от режима нанесения  $v$  для стали 65Г

зависимость коррелирует с изменением величины микротвердости, измеренной на определенном расстоянии от границы покрытие – подложка.

С повышением скорости подачи кристаллическая структура покрытий становится более разупорядоченной, что обусловлено в основном дисперсностью блоков. Вероятно, данный эффект связан с уменьшением времени обработки образца, приходящегося на единицу площади поверхности. Значит, время теплового воздействия на формирующееся покрытие уменьшается и зерна растут медленнее.

Триботехнические испытания по ГОСТ 23.224–86 в режимах на грани заедания и в стационарном режиме показали, что для пары трения Ст20Х+ покрытие Ст65Г – колодка износостойкость при заданной комплексной шероховатости практически линейно зависят от величины остаточных напряжений и микротвердости (рис. 3).

Немонотонная зависимость интенсивности изнашивания соединения от скорости подачи в некотором роде обратно пропорциональна величинам макронапряжений. Минимальное макронапряжение соответствует скорости подачи 0,114 мм/об.

Средняя интенсивность изнашивания эталонных образцов в 2,7 раза выше, чем пары трения с нанокompозитными покрытиями, нанесенными при скорости подачи электрода 0,114 мм/об., что свидетельствует об улучшении триботехнических свойств соединений, на одну из поверхностей которых нанесены наноматериалы.

Следовательно, нанокompозитные покрытия функционально пригодны для восстановления изношенных рабочих поверхностей деталей и повышения их износостойкости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмукулов Ф.Х., Лялякин В.П., Галин Д.А. Повышение межремонтного ресурса агрегатов с использованием нанoeлектро-технологий // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – № 3.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977.
3. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы / Учеб. пособие для вузов. – М.: Издат. центр «Академия», 2005.
4. Лукичев Б.И. и др. Повышение эффективности поверхности-ного упрочнения при электроискровом легировании деталей машин // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 4.