

## СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОБРАЗОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 20Х ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ СТАЛЕЙ 65Г И Св08

Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка РАСХН,  
1-й Институтский проезд, 1, г. Москва, 109428, Россия, [tehnoinvest-vip@mail.ru](mailto:tehnoinvest-vip@mail.ru)

### Введение

Поверхностная прочность материалов может быть улучшена не только совершенствованием их физико-механических свойств, но и в результате модифицирующей обработки путем нанесения защитных и упрочняющих покрытий с использованием концентрированных источников энергии, например электроискровой обработкой в газовой среде (ЭИО) стержневыми электродами.

Известно [1, 2], что наибольшей концентрацией энергии в пятне нагрева обладает импульсная электрическая искра, используемая как технологический инструмент для обработки металлов.

По данным Мелитопольского завода тракторных гидроагрегатов (МеЗТГ, Украина), ресурс отремонтированных гидрораспределителей типа Р75/80, которыми комплектуется гидросистема колёсных и гусеничных тракторов более 180 модификаций, в том числе более 350 тыс. тракторов МТЗ, ЮМЗ, Т-150, ДТ -75, ХТЗ -120–3510, Т-4, в два–шесть раз ниже новых. Поэтому актуальной задачей ресурсосбережения является повышение износостойкости восстанавливаемых соединений технологиями, обеспечивающими 100-процентный ресурс гидрораспределителей после ремонта.

**Цель работы** – изучение на поверхности стали 20Х фазового состава, микроструктуры и микротвердости, размера зёрен (кристаллитов), физико-механических свойств нанокompозитных покрытий, образованных после ЭИО компактными стержневыми электродами из сталей 65Г и Св08.

### Методика исследования

В данной работе в качестве подложки был выбран поясок золотника гидрораспределителя Р-75, представляющий собой цилиндр диаметром 25 мм, выполненный из стали 20Х (HRC 56 –63), на который методом ЭИО наносили покрытия из сталей марок 65Г и Св08. Выбор материалов электродов обусловлен их практической значимостью [1].

ЭИО проводили на токарном станке (рис. 1) установкой «Элитрон–22Б» на пятом энергетическом режиме (энергия разряда  $W = 1,66$  Дж, число импульсов  $n = 100$  Гц) [1]. Толщина покрытий измерялась с помощью пассаметра с точностью 2 мкм. Масса определялась на аналитических весах ВЛ-200.

Обрабатываемая деталь – катод для заданного режима работы вращается с постоянной скоростью. К ней подводится вращающийся с частотой  $50 \text{ с}^{-1}$  электрод–анод. После чего на станке включается продольная подача электрода со скоростями (мм/об): 0,08; 0,114; 0,193; 0,26.

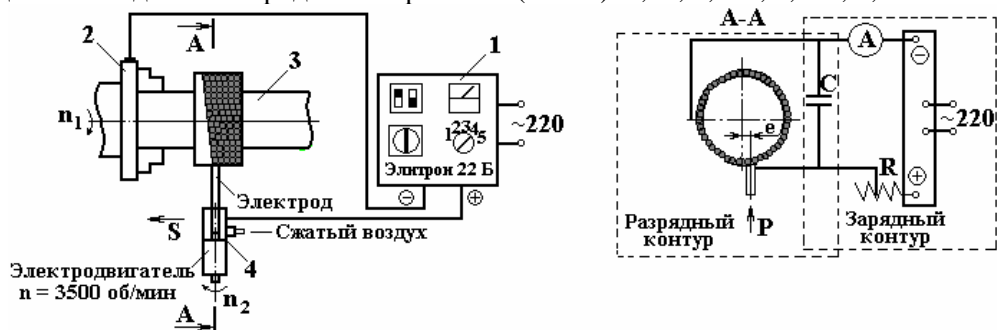


Рис. 1. Принципиальная схема работы экспериментальной установки «БИГ-3» для восстановления наружных цилиндрических поверхностей в механизированном режиме: 1 – генератор «Элитрон-22Б», 2 – патрон токарно-винторезного станка, 3 – обрабатываемая деталь, 4 – обрабатывающая головка

Металлографические покрытия образцов исследовались после их обработки на шлифовально-полированном станке «МЕТKON GRIPO 2V» с использованием микроскопа «МЕТАМ РВ-21» и микротвердомера «DURAMIN 5». Триботехнические испытания пары трения «золотник – корпус» проводили по схеме «ролик – колодка» на машине трения «СМТ-1» в режиме на грани заедания и в условиях граничного трения по ГОСТу 23.224-86 [1].

Свойства покрытия изучали дифракционным методом с помощью дифрактометра «ДРОН-6М» в  $\text{Cu K}\alpha$  дублетном излучении. Сканирование пошаговое, обработка рентгеновских спектров проведена посредством стандартной программы PDWin 4.0 (разработчик НПО «Буревестник»).

### Результаты и обсуждение

Результаты измерения привеса массы образцов представлены на рис.2, из которого видно, что изменение массы на единицу обрабатываемой поверхности с изменением скорости подачи электрода носит нелинейный характер.

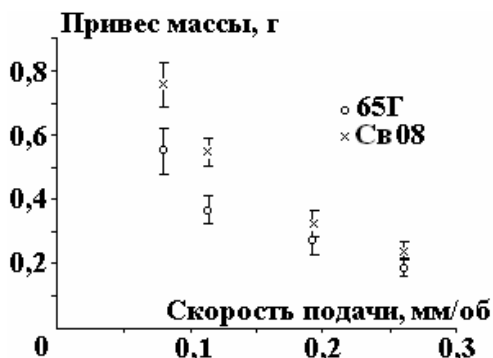


Рис. 2. Изменение массы образцов в зависимости от скорости подачи электрода

Уменьшение привеса массы детали объясняется тем, что с увеличением скорости подачи электрода происходит снижение времени обработки поверхности детали, или, другими словами, за единицу времени совершается меньшее количество единичных актов переноса.

Зависимость толщины покрытия (рис. 3) от скорости подачи аналогична изменению массы (рис. 2), за исключением того, что, начиная со скорости подачи  $s \geq 0,114$  мм/об, толщина покрытия, наносимого электродом из стали 65Г, становится больше, чем сталью Св08. Связь между толщиной покрытия и привесом массы практически линейна, что может свидетельствовать об относительной однородности (равенстве средней плотности) покрытия.

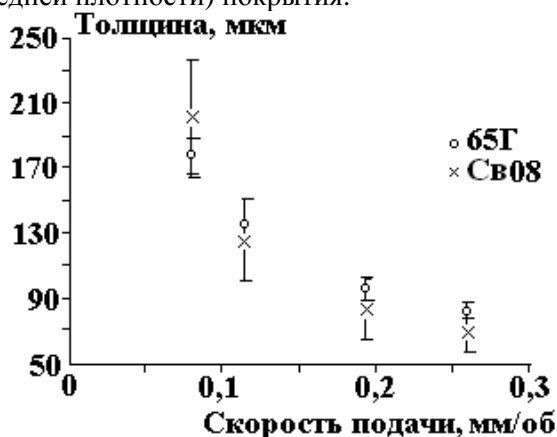


Рис. 3. Толщина покрытия в зависимости от скорости подачи

Нелинейность связи толщины покрытия от скорости подачи электрода объясняется тем, что зависимость времени обработки от скорости подачи имеет обратный характер. Уменьшение прироста массы образца с увеличением скорости подачи приводит к уменьшению толщины покрытий.

Съемка рентгенограмм производилась с боковой поверхности образца. Подбором щелей устранены искажения дифракционной картины, вызванные кривизной поверхности последнего.

Рентгенограммы покрытий, полученных с использованием электродных материалов 65Г и Св08, приведены на рис. 4.

Флуктуация линии фона обусловлена шероховатостью поверхности. Фазовый состав исследуемых покрытий соответствует фазе  $\alpha\text{-Fe}$  с включениями оксида железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Фазы карбида железа не обнаружено.

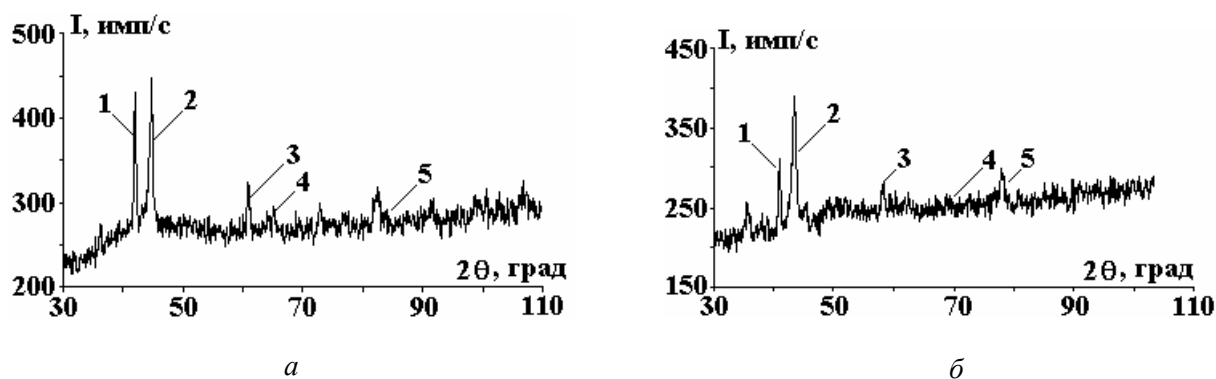


Рис. 4. Рентгенограммы покрытий, полученных при скорости подачи 0,08 мм/об. 1 и 3 – рефлексы оксида железа  $Fe_3O_4$ ; 2 – рефлекс (110)  $\alpha$ -железа; 4 – (200) и 5 – (211); а) электрод-сталь 65Г, б) электрод-сталь Св08

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

Уширение рефлексов, вызванное малыми размерами зерен, деформациями кристаллической структуры и негомогенностью, пропорционально  $\sec\theta$ ,  $\tan\theta$  и  $\sin^2\theta/\cos\theta$  соответственно, благодаря чему можно разделить три вида уширения. В данной работе параметры субструктуры покрытия рассчитывались по линиям 110 и 211 фазы  $\alpha$ -Fe [3].

По стандартной методике методом аппроксимации определено, что для всех образцов отношение физических уширений  $\frac{\beta_{211}}{\beta_{110}}$  меньше отношения  $\frac{\sec\Theta_{211}}{\sec\Theta_{110}} \cong 5,3$ , следовательно, само уширение обусловлено в основном дисперсностью кристаллитов и негомогенностью покрытия [4].

#### Полуширина рефлексов 110 и 211

Электрод – сталь 65Г			Электрод – сталь Св08		
Скорость подачи, мм/об	Полуширина 110, град	Полуширина 211, град	Скорость подачи, мм/об	Полуширина 110, град	Полуширина 211, град
0,080	0,492	0,990	0,080	0,447	0,937
0,114	0,535	1,044	0,114	0,480	1,059
0,193	0,610	1,219	0,193	0,501	1,013
0,260	0,635	1,269	0,260	0,599	0,987

В дифракционном эксперименте средний размер кристаллита определяется по формуле Уоррена:

$$\langle D \rangle = \frac{K_{hkl}\lambda}{2\cos\theta\beta(\theta)},$$

где  $K_{hkl}$  – постоянная Шеррера, значение которой зависит от формы кристаллита, домена и от индексов (hkl) дифракционного отражения;  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения;  $\theta$  – угол падения рентгеновского луча на образец (брегговский угол);  $\beta = \sqrt{(FWHM_{exp})^2 - (FWHM_R)^2}$  – уширение дифракционного отражения;  $FWHM_R$  – полная ширина дифракционной линии на половине высоты, измеряется на гомогенном образце с частицами размером 1–10 мкм.

Анализ рентгенограмм (рис. 4) показал также, что с увеличением скорости подачи средний размер зерна уменьшается.

Данный эффект характерен для обоих исследуемых покрытий и связан с уменьшением времени обработки образца, приходящегося на единицу площади поверхности (время теплового воздействия на формирующееся покрытие уменьшается, и образование блоков замедляется).

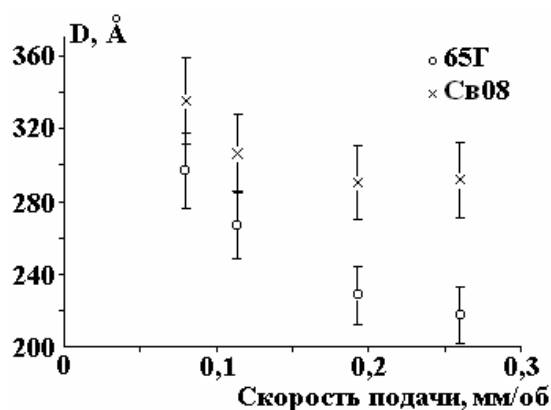


Рис. 5. Зависимость среднего размера кристаллитов от скорости подачи

Размер блоков кристаллитов на любом режиме подачи электрода меньше у покрытия, образованного электродом 65Г, чем у покрытия, нанесенного электродом Св08 (рис. 5). Это объясняется тем, что белый слой покрытия из стали 65Г имеет мартенситную структуру с упрочняющими фазами, поэтому микронапряжения в структуре материала выше, чем у покрытия проволокой Св08.

В зоне контакта электрода с поверхностью обрабатываемой детали температура разряда достигает  $10^4$  К. А так как образец достаточно массивный, 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, поэтому происходит отпуск образца.

Для определения характера влияния изменения структуры на механические свойства поверхности образцов были проведены металлографические исследования. На рис. 6 представлены фотографии поперечных шлифов образцов. Как следует из рис. 6, покрытие состоит из трех слоев: 1 – нанесенный слой (белый); 2 – термодиффузионный слой; 3 – материал подложки (рис. 7). Толщина термодиффузионного слоя равна 1/2–3/4 белого. Он возникает в зоне наибольшего термического влияния ЭИО на подложку.

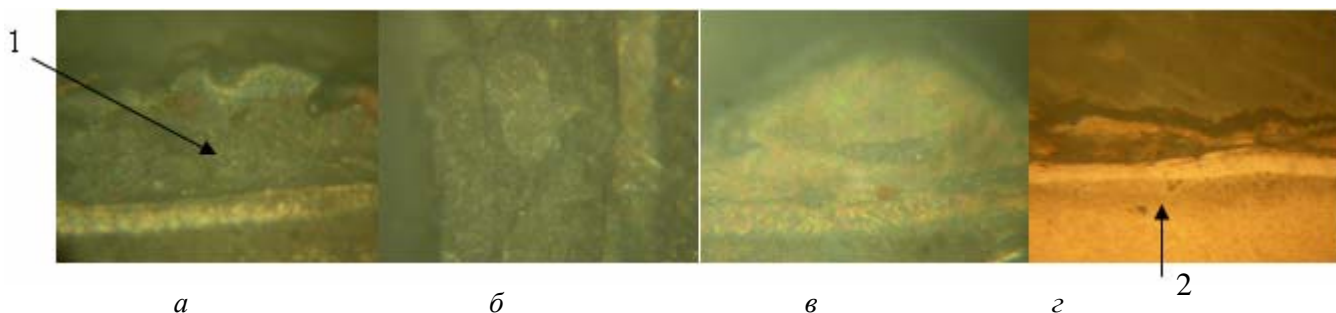


Рис. 6. Фотографии протравленных поперечных шлифов образцов с покрытиями а), б) электрод - сталь 65Г, скорость подачи 0,193 мм/об, x400; в) электрод – сталь Св08, скорость подачи 0,114 мм/об, x300; г) электрод – сталь Св08, скорость подачи 0,193мм/об, x125

Покрyтия обладают высокой шероховатостью и сильной неоднородностью. На фотографии отчетливо видны поры и окислы. С увеличением скорости подачи электрода покрытие становится менее дефектным.

Структура белого слоя от поверхности покрытия до диффузионного меняется, достигая наибольшей плотности у его границы (светлая полоса на травленном шлифе). Можно предположить, что при воздействии на поверхность сталей концентрированного источника тепла приграничная область обогащается углеродом и различного рода дефектами, в результате чего образуется ультрадисперсная структура с размерами кристаллитов 30–200 нм [5].

При восстановлении прецизионных пар трения, как правило, белый слой частично удаляется притиркой (до 50%), чтобы использовать слой высокой сплошности, обладающий высокой несущей способностью и износостойкостью.

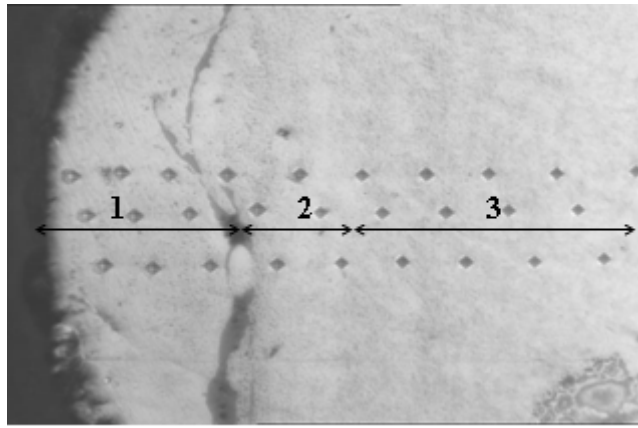


Рис. 7. Фотография дорожки уколов,  $\times 300$

Для определения величины микротвердости по Виккерсу на поверхности поперечного шлифа, начиная с края, производились уколы с заданным шагом (рис. 7). За начало отсчета выбран приграничный слой подложки, потому что он достаточно ровный и легко наблюдается.

Пятикратным повторением измерений и последующим усреднением получено распределение величины микротвердости по глубине покрытия (рис. 8, 9).

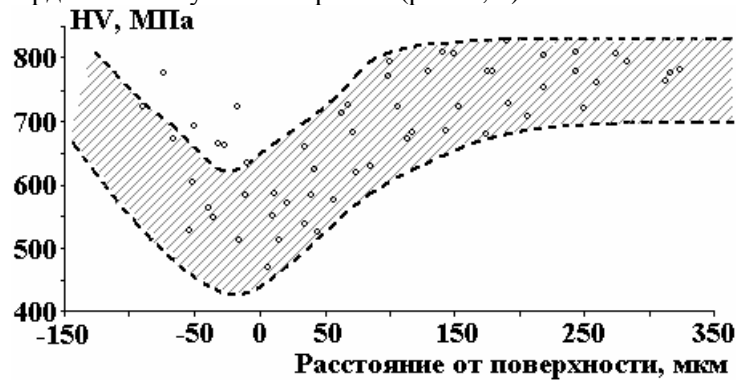


Рис. 8. Общий характер изменения по глубине величины микротвердости покрытия, полученного при нанесении сталью 65Г со скоростью подачи 0,08 мм/об

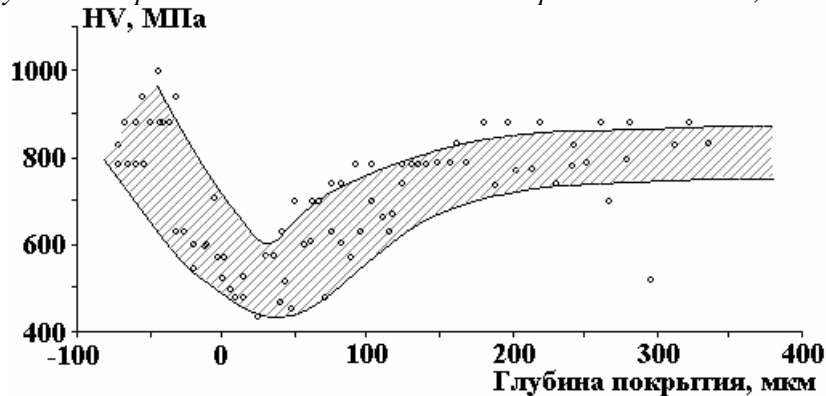


Рис. 9. Общий характер изменения по глубине величины микротвердости покрытия, полученного при нанесении сталью Св 08 со скоростью подачи 0,26 мм/об

Установлено, что характер изменения микротвердости покрытия по глубине практически одинаков. Для закаленных сталей микротвердость покрытия от поверхности к подложке снижается практически по линейному закону, достигая минимального значения в термодиффузионной зоне, а затем повышается до исходного значения подложки.

Средняя микротвердость покрытия диффузионной зоны, образованной при обработке электродом 65Г, на 12% выше, чем электродом Св08. Это объясняется тем, что электродная проволока Св08 низкоуглеродистая, структура диффузионной зоны мало обогащена углеродом. С повышением скорости подачи электрода разупрочнённая зона сдвигается в глубь подложки.

Разброс значений микротвердости HV слева от нуля свидетельствует о значительном разупрочнении структуры покрытия. Такое поведение HV покрытия можно объяснить тем, что его нанесение происходит послойно, каждый последующий слой наносится на предыдущий. Это приводит к

отжигу (исчезновению дефектов в структуре) последнего. Отжигом объясняется и уменьшение величины микротвердости в приграничном слое.

На рис. 10 и 11 показан характер зависимости величины микротвердости на расстоянии 15 и 34 мкм от границы покрытие-подложка, т.е. светлой полосы на травленном шлифе (рис.6), от скорости подачи электрода.



Рис. 10. Зависимость величины микротвердости на расстоянии 15 мкм от границы покрытие-подложка от скорости подачи



Рис. 11. Зависимость величины микротвердости на расстоянии 34 мкм от границы покрытие-подложка от скорости подачи

Анализ экспериментальных данных показывает, что микротвердость белого слоя наибольшей плотности при обработке электродом 65Г достигается при скорости подачи электрода 0,114 мм/об, а электродом Св08 – 0,26 мм/об.

Как следует из рис. 3, наибольшая толщина покрытия достигается при подаче электрода 0,114 мм/об. Поэтому из технологических потребностей более предпочтительным является восстановление изношенных золотников электродом 65Г с подачей 0,114 мм/об. В этом режиме нанесения покрытия средний размер блоков кристаллитов равен 26 нм (см. рис. 5).

Величина макронапряжений (остаточных напряжений) определена по методу  $\sin^2\psi$  (рис. 12) [4].

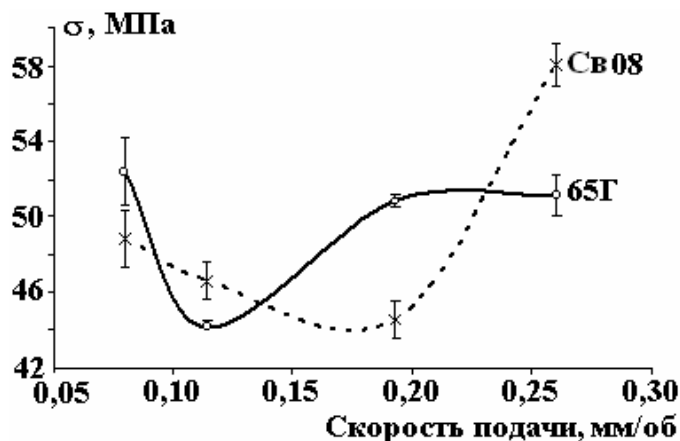


Рис. 12. Зависимость величины остаточных напряжений от скорости подачи (знак «+» свидетельствует о растягивающем характере макронапряжений)

Характер зависимости остаточных напряжений от скорости подачи немонотонный как для стали 65Г, так и для стали Св08, что свидетельствует о сложности процессов образования структуры в поверхностном слое. Можно предположить, что с уменьшением времени теплового воздействия подвижность дефектов, которые могут проникать в верхние слои, меняется определенным образом.

Из рис. 10, 11 и 12 следует, что для покрытия из стали 65Г с уменьшением остаточных напряжений растяжения увеличивается микротвердость, достигая своего максимального значения при продольной подаче электрода  $s = 0,114$  мм/об. Следовательно, если покрытия подвергнуть поверхностно-пластической деформации, его микротвёрдость должна возрасти.

Износостойкость покрытий определяли сравнением интенсивности изнашивания эталонных образцов, изготовленных из стали 20Х (HRC 56–63), с аналогичными образцами после нанесения слоя покрытия методом ЭИО и притирки. Триботехнические испытания показали, что интенсивность изнашивания пары трения, поверхность ролика которого наплавлена сталью 65Г при подаче электро-

да  $s = 0,114$  мм/об, в 1,8–2,4 раза меньше, чем у эталонного соединения (рис. 13). Это обусловлено тем, что микротвердость покрытия в 1,27 раза больше микротвердости основы, а величина комплексной шероховатости в 2,8 раза меньше, чем у эталонного ролика.



Рис. 13. Зависимость суммарной интенсивности изнашивания пар трения:

1 – эталонная пара трения – ролик (сталь 20Х) – колодка (чугун СЧ15); 2, 3 и 4 – пары трения, на поверхность ролика которых нанесено покрытие из стали 65Г при подаче электрода 0,114, 0,193 и 0,26 мм/об соответственно

Кроме этого, поверхность трения у ролика хорошо смачивается смазкой из-за наличия несквозных ямок, удерживающих смазку [1].

#### **Выводы**

1. Увеличение скорости продольной подачи детали при механизированной ЭИО приводит к уменьшению массопереноса и толщины покрытия, что объясняется снижением времени обработки поверхности, то есть за единицу времени совершается меньшее количество единичных актов переноса. Средняя плотность нанесенного материала постоянна.

2. Фазовый состав исследуемых покрытий соответствует фазе чистого  $\alpha$ -Fe с включениями оксида железа  $Fe_3O_4$ .

3. С повышением скорости подачи кристаллическая структура покрытий становится более разупорядоченной, что обусловлено в основном ультрадисперсностью блоков.

4. Зависимость микротвердости по глубине неоднородная. Поведение HV в покрытии можно объяснить тем, что нанесение покрытия происходит послойно и каждый последующий слой наносится на предыдущий. Это приводит к частичному отжигу последнего. Отжигом объясняется и уменьшение величины микротвердости в приграничном слое.

5. Зависимость величины макронапряжений (остаточных напряжений) от скорости подачи немонотонна и коррелирует с изменением микротвердости, что характерно для обоих электродных материалов.

6. Интенсивность изнашивания пары трения, поверхность ролика которого наплавлена сталью 65Г методом ЭИО при подаче электрода  $s = 0,114$  мм/об, в 1,8–2,4 раза меньше, чем у эталонного соединения.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Саранск: тип. “Красный Октябрь”. 2003. 340 с.
2. Михайлюк А.И., Гитлевич А.И., Рапопорт Л.С. и др. Влияние режимов электроискрового легирования на структуру и износостойкость железа // Электрические методы обработки поверхности. 1988. № 4. С. 10–13.
3. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / М.: МИСИС. 1994. 328 с.
4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. 2-е изд., исп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 416 с.

5. Бурумкулов Ф.Х., Окин М.А., Иванов В.И. Влияние физико-механических свойств и остаточных напряжений электроискровых покрытий на износостойкость соединений // Ремонт, восстановление, модернизация. № 3. 2009. С. 17–23.

*Поступила 17.08.09*

### **Summary**

Phase composition, size of grains (crystallites), microstructure and microhardness, physical and mechanical properties of nanocomposite coatings on steel surface 20H, formed after the Electrical processing of the gas medium of the compact electrical steels 65G and Sv08 depending on the speed of processing and their influence on the wear resistance of the connection.

---