

УДК 621.357.77

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-35-43

Исследование физико-механических и трибологических свойств медных гальванических покрытий, полученных с добавлением медного электроэрозионного нанопорошка

© 2016 г. **Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев**

Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), г. Курск

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Статья поступила в редакцию 13.03.15 г., доработана 15.12.15 г., подписана в печать 18.12.15 г.

Представлены результаты исследования свойств медных гальванических покрытий, изготовленных на гальванической установке L1-210 v2 (Италия) с использованием электролита гальванического блестящего меднения фирмы «24 Карата» (Москва) и добавки электроэрозионного медного нанопорошка, полученного электроэрозионным диспергированием (ЭЭД) отходов медной проволоки в воде дистиллированной. Для ЭЭД токопроводящих материалов применялась оригинальная установка, разработанная авторами (патент 2449859 РФ). Значения коэффициента трения и фактора износа, полученные при испытаниях покрытий на автоматизированной машине трения «Tribometer» (CSM Instruments, Швейцария), свидетельствуют об отсутствии существенных отличий в износостойкости образцов. Испытания твердости образца по поверхности проводили с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8 по методу микроВиккерса при нагрузке на индентор 25 г по 10 отпечаткам со свободным выбором места укола в соответствии с ГОСТ 9450-76. Время нагружения индентора составляло 15 с. Установлено, что микротвердость медного покрытия с добавкой наночастиц меди на 15 % выше, чем у стальной подложки и образца со стандартным медным покрытием.

Ключевые слова: отходы медной проволоки, медные нанопорошки, электроэрозионное диспергирование, получение нанопорошков, гальваническое покрытие, коэффициент трения, фактор износа, микротвердость.

Агеева Е.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии ЮЗГУ (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94). Тел.: (4712) 32-68-79. E-mail: ageeva-ev@yandex.ru.

Латыпов Р.А. – докт. техн. наук, профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства МАМИ (107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38). Тел.: (495) 223-05-23. E-mail: latipov46@mail.ru.

Хорьякова Н.М. – аспирант, препод. кафедры автомобилей, транспортных систем и процессов ЮЗГУ. E-mail: 79103114369@yandex.ru; natali030119891@yandex.ru.

Агеев Е.В. – докт. техн. наук, доцент, рук-ль Науч.-образ. центра «Порошковая металлургия и функциональные покрытия» ЮЗГУ. E-mail: ageev_ev@mail.ru.

Для цитирования: Агеева Е.В., Латыпов Р.А., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Исследование физико-механических и трибологических свойств медных гальванических покрытий, полученных с добавлением медного электроэрозионного нанопорошка // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 1. С. 35–43.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-35-43.

Ageeva E.V., Latypov R.A., Horyakova N.M., Ageev E.V.

Study of physical, mechanical and tribological properties of copper electroplated coatings obtained with the addition of electroerosion copper nanopowder

The paper presents the results obtained when studying the properties of copper electroplated coatings prepared at the L1-210 v2 (Italy) galvanizing plant using bright copper plating electrolyte by the «24 Carats» company (Moscow) and addition of the electroerosion copper nanopowder prepared by the electro erosion dispersion (EED) method from copper wire scrap in distilled water. An original unit developed by the authors (Russian Federation Patent 2449859) was used for EED conductors. Values of the friction coefficient and wear factor obtained in coatings tests at the Tribometer automated friction machine (CSM Instruments, Switzerland) showed no significant differences in wear resistance of samples. The hardness tests on sample surfaces were carried out using the DM-8 automatic micro hardness tester by the Micro Vickers method with the 25 g indenter load for 10 indentations with random indentation points in accordance with GOST 9450-76. Indenter loading time was 15 seconds. It was found that microindentation hardness of the copper coating with added copper nanoparticles is 15% higher than that of the steel substrate and the sample with the standard copper coating.

Keywords: copper wire scrap, copper nanopowders, electro erosion dispersion, nanopowder production, electroplated coating, friction coefficient, wear factor, microhardness.

Ageeva E.V. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of fundamental chemistry and chemical engineering, Southwest State University (SWSU) (305040, Russia, Kursk, 50 years of October str., 94). Tel.: (4712) 32-68-79. E-mail: ageeva-ev@yandex.ru.

Latypov R.A. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of equipment and technology of welding production, Moscow State Engineering University (107023, Russia, Moscow, Bolshaya Semenovskaya str., 38). Tel.: (495) 223-05-23. E-mail: latipov46@mail.ru.

Horyakova N.M. – postgraduate student, lecturer, Department of vehicles, transport systems and processes, SWSU. E-mail: 79103114369@yandex.ru; natali030119891@yandex.ru.

Ageev E.V. – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of the Scientific-educational centre «Powder metallurgy and functional coatings», SWSU. E-mail: ageev_ev@mail.ru.

Citation: Ageeva E.V., Latypov R.A., Horyakova N.M., Ageev E.V. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh i tribologicheskikh svoystv mednykh gal'vanicheskikh pokrytii, poluchennykh s dobavleniem mednogo elektroerozionnogo nanoporoshka. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 1. С. 35–43. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-35-43.

Введение

На сегодняшний день качество в гальванотехнике является важнейшим показателем конкурентоспособности. В связи с известной экономической ситуацией поступлений новых инвестиций в усовершенствование гальванических установок в последние годы было относительно немного, а основная часть публикаций посвящалась вопросам улучшения качества покрытий и уменьшения их стоимости [1]. На наш взгляд, особый интерес представляет модификация известных гальванических покрытий наночастицами, что позволяет решить указанные проблемы.

За последнее время был разработан ряд новых решений, прежде всего в области свойств покрытий, позволяющих значительно расширить диапазон применения покрытий, содержащих наночастицы. Например, при их равномерном распределении по границам зерен можно значительно улучшить коррозионную стойкость гальванических покрытий [1, 2]. С помощью наночастиц можно осаждать покрытия с антиотражающей, антифрикционной и самоочищающейся поверхностью, а также изготавливать регулировочные шайбы и термостойкие изделия для автомобилей [1]. Литературный анализ показал, что значительное влияние на свойства гальванических покрытий оказывает диспергирование в матрице покрытия частиц размером до 500 нм [1, 2].

Хотя применение нанотехнологий в гальванотехнике пользуется повышенным интересом уже в течение нескольких лет, тем не менее их широкое распространение сдерживается из-за высокой стоимости наночастиц и нанопорошков.

Для получения наноразмерных частиц часто применяют электрохимические методы. На наш взгляд, метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) выглядит весьма привлекательно для получения дисперсных систем. Процесс ЭЭД представляет собой разрушение токопроводящего материала в результате локального воздействия на него кратковременных электрических разрядов между электродами. Метод позволяет нанодиспергировать металлы и сплавы, процесс проходит внутри диэлектрической жидкости, продукты трансформации которой покрывают образующиеся наночастицы [3–15]. Такой способ не позволяет получать частицы с узким распределением их по размерам, однако это и не требуется [1, 2]. В зависимости от условий проведения процесса ЭЭД,

природы металла и среды диспергирования разброс частиц колеблется в интервале 2,5–20 нм, но при этом имеются и отдельные частицы величиной до 100 нм и более [5, 13, 14]. Считается, что мелкие частицы образуются при закалке паров металла, а крупные — из расплавленных капель. Однако ЭЭД обладает очень существенными конкурентными преимуществами, такими как простота конструкции оборудования, возможность работы в жидкой среде, получения сферических наночастиц с размерами 2,5–100 нм, использования в качестве металлической загрузки отходов, управления характеристиками получаемых порошков, безвредность и экологическая чистота процесса, отсутствие механического износа оборудования, малые энергозатраты, а следовательно, значительно меньшая себестоимость полученных нанопорошков [6–9].

Учитывая вышесказанное, модификация известных гальванических покрытий наночастицами, полученными электроэрозионным диспергированием отходов, весьма актуальна, так как помимо улучшения качества покрытий реально снижение их стоимости.

Целью настоящей работы было получение электроэрозионного медного нанопорошка из отходов электротехнической медной проволоки, а также создание и исследование медных гальванических покрытий, полученных с добавлением указанного нанопорошка.

Методика исследований

Получение нанопорошка меди методом ЭЭД

Для получения нанопорошка меди из медных отходов использовали установку для ЭЭД токопроводящих материалов [15]. В качестве диспергируемого материала для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы электротехнической медной проволоки. В роли рабочей жидкости — вода дистиллированная. Процесс ЭЭД медных отходов проводили при следующих электрических параметрах установки: частота следования импульсов 100–120 Гц; напряжение на электродах 200–220 В; емкость конденсаторов 25,5 мкФ.

Наночастицы меди с помощью центрифуги отделяли от крупноразмерных. Оставшуюся после центрифугирования суспензию выпаривали. Осевший на стенки посуды для выпаривания нанопорошок смывали электролитом блестящего меднения, который в дальнейшем использовали для нанесения медного гальванического покрытия.

Получение гальванических медных покрытий

Гальванические медные покрытия получали электроосаждением слоя меди из электролита, содержащего ионы этого металла, с помощью гальванической установки «L1-210 v2» (Италия). Подложкой служила сталь 30ХГСА. Для подготовки стальной поверхности применяли состав (универсальный) электрохимического обезжиривания и раствор для электрохимической активации металлов фирмы «24 Карата» (г. Москва).

В качестве электролита использовали электролит гальванического блестящего меднения фирмы «24 Карата». На сталь медное покрытие наносили после никелевого, полученного с помощью электролита никелирования подслоя фирмы «24 Карата». Технологические параметры подготовки стальной подложки, нанесения подслоя никеля и слоя меди представлены в табл. 1. Были получены стандартное покрытие и покрытие с добавкой электроэрозионных наночастиц меди.

Исследование микроструктуры образцов

Микроструктуру образцов (по поперечному шлифу) изучали методом растровой электронной микроскопии с использованием электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 600 FEG» с полевой эмиссией электронов (производитель — FEI, Нидерланды).

Поверхность образцов шлифовали и полировали. Шлифование осуществляли металлографи-

ческой бумагой с крупным (№ 60—70) и мелким (№ 220—240) зерном. В процессе шлифования образец периодически поворачивали на 90°. Частицы абразива смывали водой и подвергали образец полированию на круге суспензиями из оксидов металла (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3). После достижения зеркального блеска поверхность шлифа промывали водой, спиртом и просушивали фильтровальной бумагой.

Определение шероховатости поверхности

Шероховатость поверхности оценивали с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра SURTRONIC 25 (Великобритания). Изучение линейного профиля поверхности проводили путем измерения вертикального отклонения алмазного наконечника (щупа), перемещающегося под минимальной нагрузкой с постоянной скоростью в условиях механического контакта с образцом. По результатам измерений определяли поверхностный профиль вдоль прямой линии и с помощью программного обеспечения рассчитывали параметры шероховатости поверхности (с помощью указанного прибора возможно определение 35 параметров шероховатости согласно стандартам ГОСТ 2789-73, ISO, ANSI, JIS, DIN).

Определение коэффициента трения и интенсивности износа покрытий

Коэффициент трения и интенсивность износа поверхности образца и контртела измеряли на автоматизированной машине трения «Tribometer» (CSM Instruments, Швейцария), управляемой ком-

Таблица 1. Технологические параметры подготовки стальной подложки, нанесения подслоя никеля и слоя меди

№ стадии	Электролит	Материал анода	Соотношение площадей анод/катод	Материал ванны	t , °C	U , В	i , А/дм ³
Обезжиривание стальной поверхности							
1	Состав электрохимического обезжиривания (универсальный)	Нержавеющая сталь	1 : 1	Химстекло	Комнатная	10	15
Активация стальной поверхности							
2	Раствор для электрохимической активации металлов	Нержавеющая сталь	1 : 1	Химстекло	Комнатная	2,5	4
Нанесение подслоя никеля							
3	Электролит гальванического никелирования	Анодный никель НПА-1	1 : 1	Химстекло	Комнатная	1,5	3
Нанесение медного покрытия							
4	Электролит гальванического блестящего меднения*	Анодная медь АМФ	1 : 1	Химстекло	Комнатная	2,5	6
* Перемешивание нанопорошка меди в электролите обязательно.							

пьютером, по стандартной схеме испытания «шарик—диск».

Испытания проводили на воздухе при нагрузке 1,5 Н и линейной скорости 4 см/с, с радиусом кривизны поверхности износа 8—9 мм, путь трения составлял 100 и 200 м. Износостойкость образца и контртела оценивали по формуле

$$W = V/(Pl), \quad (1)$$

где W — интенсивность износа, $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; V — объем удаленного материала, мм^3 ; P — нагрузка, Н; l — путь трения, м.

Определив диаметр поверхности износа шарика с помощью оптического инвертированного микроскопа «Olympus GX 51» (Нидерланды), объем удаленного материала на шарике рассчитывали следующим образом:

$$V = \pi h^2 (r - \frac{1}{3}h), \quad (2)$$

где $h = r - (r^2 - [d/2]^2)^{1/2}$ — высота сегмента, мм; d — диаметр поверхности износа шарика, мм; r — радиус шарика, мм.

Объем удаленного материала образца определяли по сечению дорожки износа на его поверхности, измеренному с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра «Surtronic 25» (Taylor Hobson, Великобритания), с использованием формулы

$$V = sl_0, \quad (3)$$

где l_0 — длина окружности, мм; s — площадь поперечного сечения дорожки износа, мм^2 .

Определение твердости поверхности образца

Испытания твердости поверхности образца проводили с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8 по методу ми-

кроВиккерса при нагрузке на индентор 25 г по 10 отпечаткам со свободным выбором места укола в соответствии с ГОСТ 9450-76 (Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников). Время нагружения индентора составляло 15 с.

Результаты и их обсуждение

Изучение формы и морфологии медных нанопорошков, полученных методом ЭЭД из отходов медной проволоки, было выполнено на растровом электронном микроскопе «QUANTA 600 FEG» (Германия). Результаты исследования представлены на рис. 1 [8]. Видно, что в медном порошке присутствуют частицы правильной (сферической и эллиптической) формы и агломераты.

Методом растровой электронной и оптической микроскопии было проведено исследование микроструктуры образцов медных гальванических покрытий (по поперечному шлифу) — без добавки и с добавкой электроэрозионных наночастиц меди. Результаты исследований показаны на рис. 2 и 3.

Установлено, что у покрытия, полученного с добавлением наночастиц электроэрозионной меди, более плотная структура и оно практически не имеет пор.

Результаты испытания твердости образца по поверхности приведены в табл. 2.

Отмечено, что введение наночастиц меди (высокотвердых, образующихся при закалке паров металла в рабочей жидкости при диспергировании) повышает на 15 % микротвердость медного покрытия по сравнению с микротвердостью стальной подложки и стандартного медного покрытия.

Результаты определения шероховатости поверхности с помощью автоматизированного прецизи-

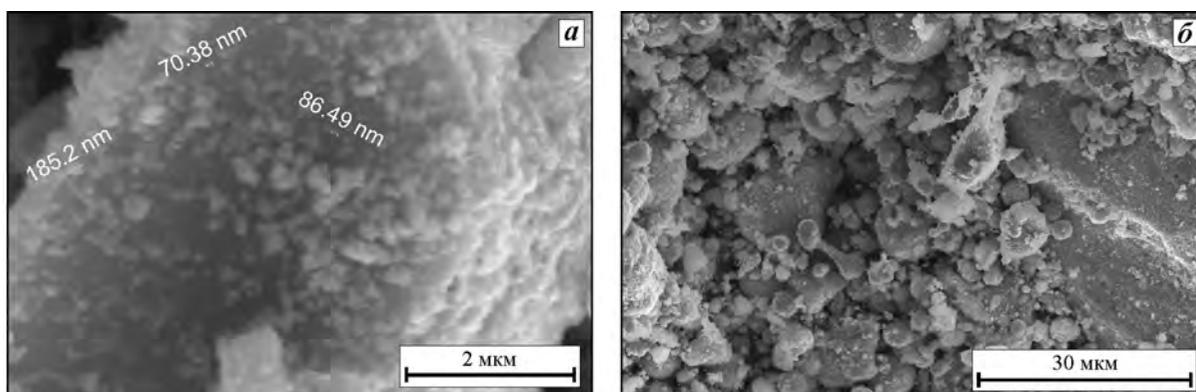


Рис. 1. Форма и морфология медных нанопорошков при различных увеличениях

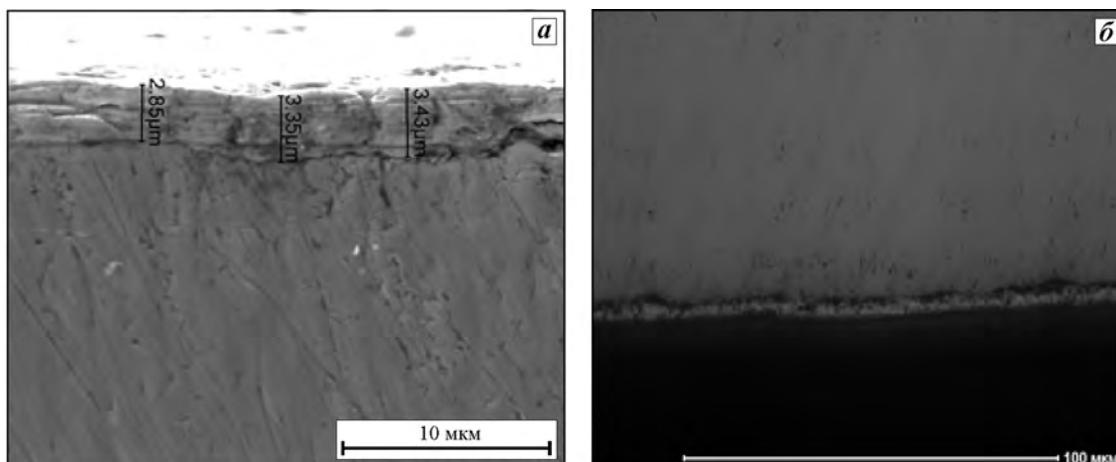


Рис. 2. Микроструктура образца медного покрытия
a – поперечный шлиф (Quanta 200 3D), *б* – поверхность (OLYMPUS GX51)

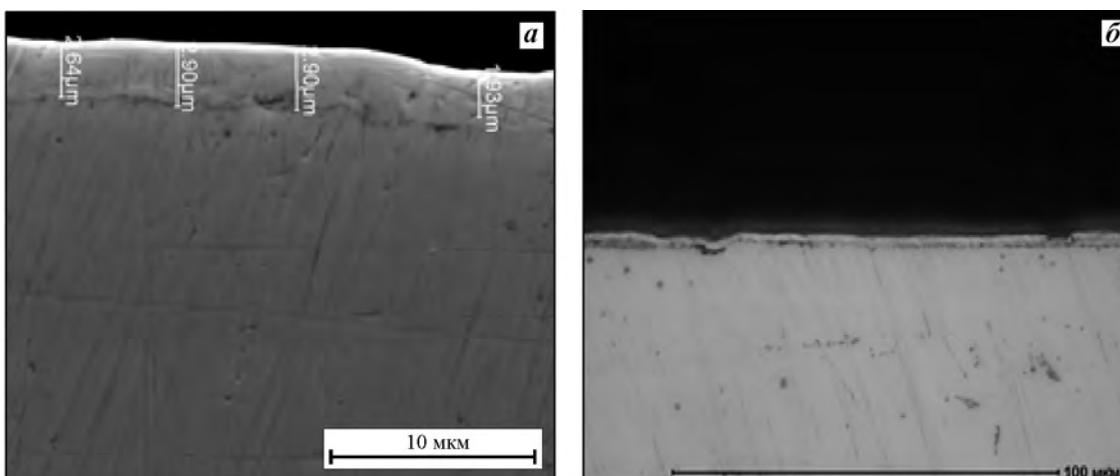


Рис. 3. Микроструктура образца медного покрытия с добавкой электроэрозионных наночастиц меди
a – поперечный шлиф (Quanta 200 3D), *б* – поверхность (OLYMPUS GX51)

онного контактного профилометра SURTRONIC 25 представлены на рис. 4. Экспериментально измерены следующие параметры шероховатости покрытий: среднее арифметическое отклонение профиля (R_a) и высота неровностей профиля по 10

точкам (R_z). Для стандартного медного покрытия получили $R_a = 0,434$; $R_z = 4,17$, для медного покрытия с добавкой электроэрозионных наночастиц — $R_a = 0,525$, $R_z = 5,55$.

Установлено, что показатели шероховатости у медного покрытия с добавкой электроэрозионных наночастиц меди незначительно выше, чем у обычного медного покрытия. Средние арифметические отклонения профилей обоих покрытий соответствуют 8-му классу шероховатости деталей, а высота неровностей профиля по 10 точкам — 7-му классу.

Результаты измерения коэффициента трения (μ) и интенсивности износа (W) поверхности образцов и контртела с использованием автоматизированной машины трения «Tribometer» приведены

Таблица 2. Среднее значение твердости по Виккерсу исследованных образцов

Образец	Твердость по Виккерсу	
	HV	ГПа
Сталь	267,0	2,67
Медное покрытие	266,0	2,66
Медное покрытие с наночастицами меди	316,0	3,16

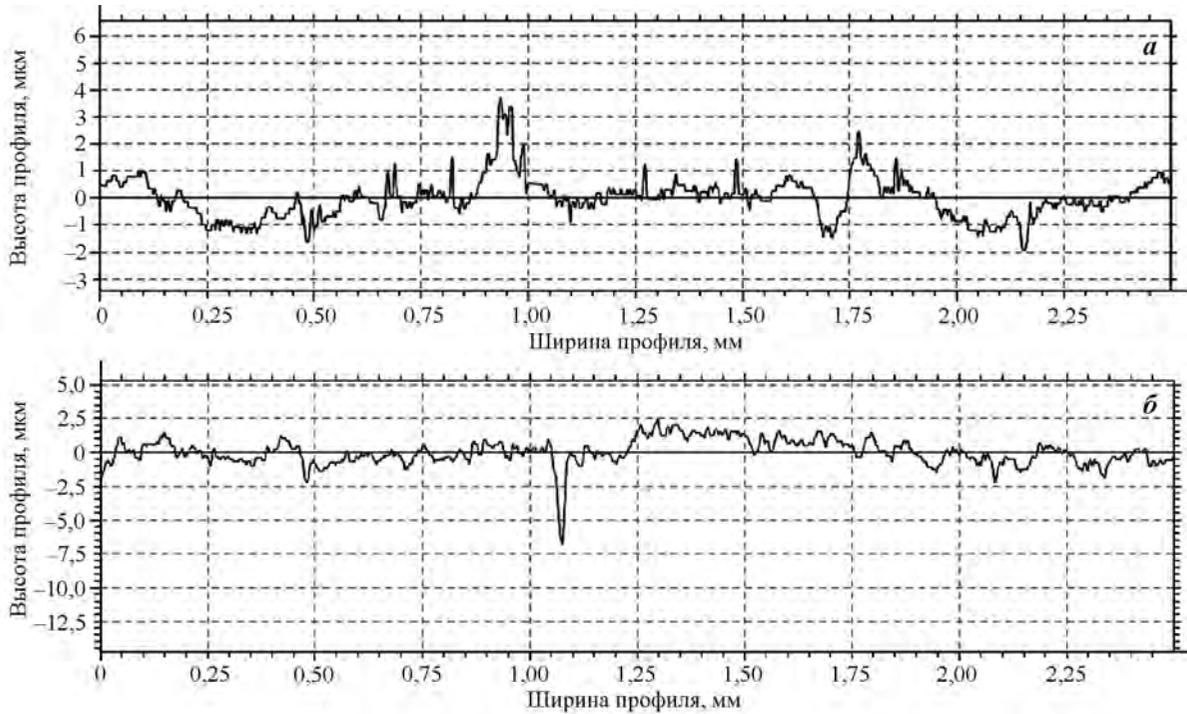


Рис. 4. Шероховатость поверхности исследуемых образцов

a – медное покрытие; *б* – медное покрытие с добавкой электроэрозионных наночастиц меди

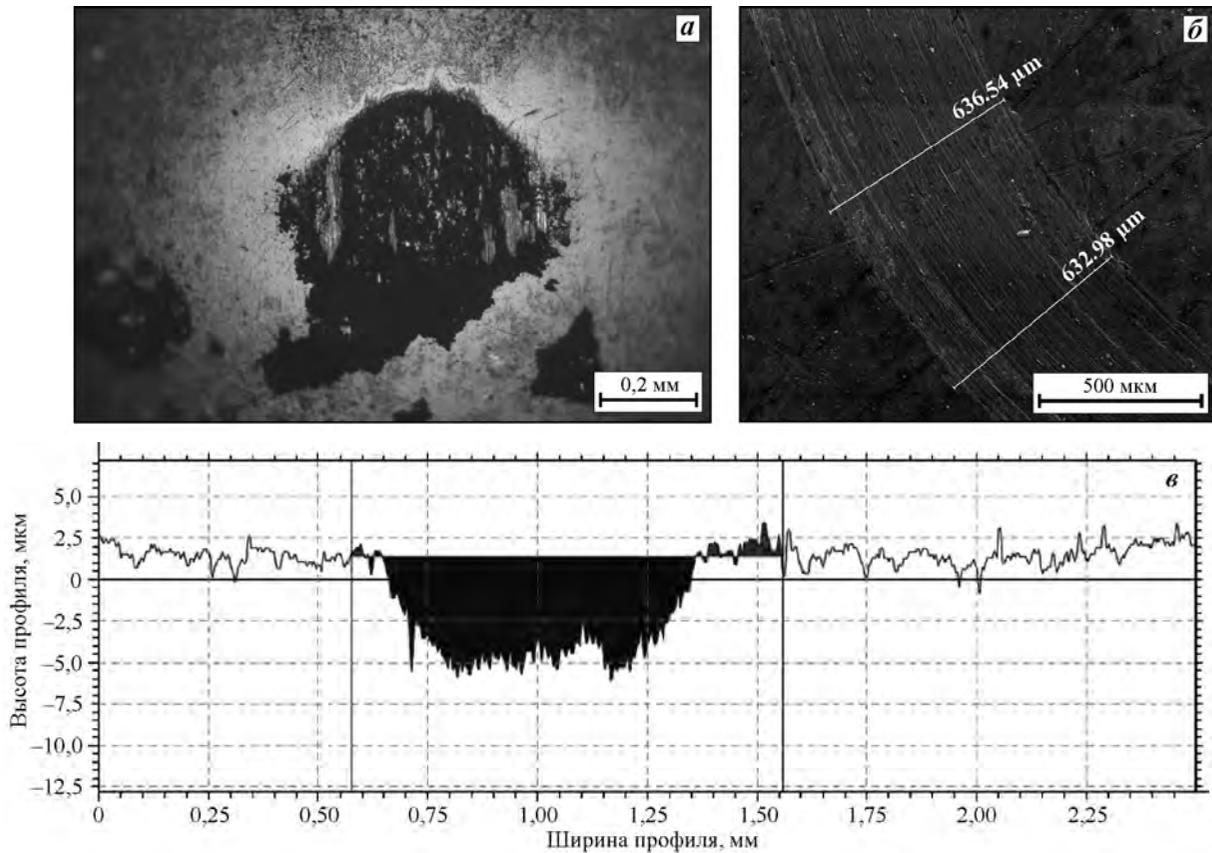


Рис. 5. Поверхность разрушения пары трения «контртело (шарик) – медное покрытие»

a – оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после многократных проходов по исследуемой поверхности образца ($\times 100$); *б* – зона механического контакта контртела с покрытием; *в* – профиль бороздки износа поверхности образца

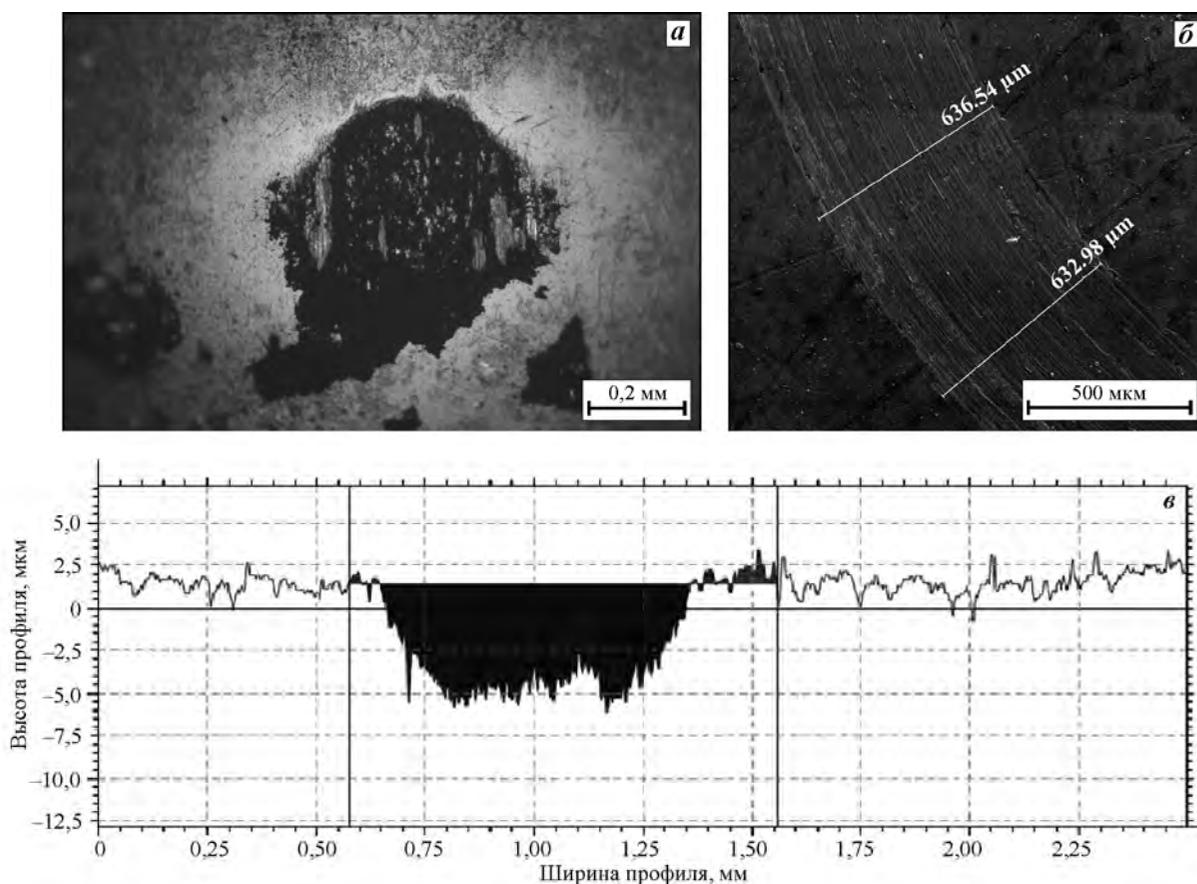


Рис. 6. Поверхность разрушения пары трения «контртело (шарик) — медное покрытие с наночастицами меди»
а — оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после многократных проходов по исследуемой поверхности образца ($\times 100$); **б** — зона механического контакта контртела с покрытием; **в** — профиль бороздки износа поверхности образца

в табл. 3. Лучшая износостойкость модифицированного покрытия связана с введением высокопрочных наночастиц электроэрозионной меди и большей микротвердостью самого покрытия.

После испытаний были изучены поверхности разрушения обоих компонентов пары трения «контртело (шарик) — медное покрытие» — без добавок (рис. 5) и с введенными наночастицами меди (рис. 6).

Таблица 3. Трибологические характеристики исследуемых покрытий

Образец	Средний коэффициент трения (μ)	$W, 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	
		Контртело	Образец
Сталь	0,942	16,17	109,0
Медное покрытие	0,943	7,283	254,2
Медное покрытие с наночастицами меди	0,972	5,457	231,4

Заключение

В ходе проведенного исследования получены и изучены медные гальванические покрытия — стандартное и модифицированное, с добавлением медного электроэрозионного нанопорошка из отходов электротехнической медной проволоки. По результатам сравнительных экспериментальных исследований было установлено следующее:

- высота неровностей профиля по 10 точкам и среднее арифметическое отклонение профиля у медного покрытия с добавкой электроэрозионных наночастиц меди незначительно больше, чем у стандартного медного покрытия;

- микротвердость медного покрытия с добавкой наночастиц меди, по сравнению со стальной подложкой и стандартным медным покрытием, на 15 % выше;

- результаты трибологических испытаний показали чуть лучшую износостойкость модифицированных покрытий, связанную с введением вы-

сокотвердых наночастиц электроэрозионной меди и большей микротвердостью самого покрытия.

Литература

1. Колмыков Д.В. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей гальваническими покрытиями // Главный механик. 2010. No. 10. С. 33—38.
2. Серебровский В.В., Сафронов Р.И. Восстановление и упрочнение деталей машин гальваническими покрытиями // Механизация и электрификация сельск. хоз-ва. 2007. No. 1. С. 18—19.
3. Юдин В.М. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин гальваническими покрытиями на основе цинка // Вестн. Орловского гос. аграр. ун-та. 2009. Т. 16. No. 1. С. 24—25.
4. Виноградова С.С., Кайдриков Р.А., Журавлев Б.Л. Электрохимические методы контроля коррозионной стойкости многослойных гальванических покрытий // Вестн. Казанского технол. ун-та. 2006. No. 3. С. 116—120.
5. Виноградова С.С., Кайдриков Р.А., Журавлев Б.Л. Развитие электрохимических методов оценки коррозионной стойкости многослойных гальванических покрытий // Альманах соврем. науки и образования. 2008. No. 7. С. 39—42.
6. Юдин В.М., Вихарев М.Н., Филина Н.Н. Восстановление деталей гальваническими покрытиями на основе цинка при больших плотностях тока // Тр. ГОСНИТИ. 2012. Т. 110. No. 2. С. 58—60.
7. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Анализ цинковых покрытий на основе их структурных и электрохимических свойств // Коррозия: материалы, защита. 2013. No. 10. С. 30—38.
8. Мальшев В.В., Габ А.И. Высокотемпературные гальванические покрытия молибдена, вольфрама и их карбидов из ионных расплавов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012. Т. 48. No. 2. С. 213—217.
9. Киреев С.Ю., Перелыгин Ю.П. Теория, методы измерения и область применения переходного сопротивления гальванических покрытий // Гальванотехника и обраб. поверхности. 2010. Т. XVIII. No. 4. С. 19—26.
10. Дорофеев Ю.Г., Липкин М.С., Науменко А.А., Рыбалко Е.А., Сиротин П.В., Ивашин И.Н., Липкин В.М. Получение медных порошков из аммиакатных электролитов и их свойства // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2012. No. 3. С. 3—7.
11. Золотухина Л.В., Кузнецов М.В., Гельчинский Б.Р., Жидовинова С.В., Арефьев И.Г. Исследование поверхно-

сти частиц ультрадисперсных медных порошков, полученных способом газофазной конденсации // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2011. No. 1. С. 14—20.

12. Артамонов В.В., Артамонов В.П., Перекопная Е.Ю., Абишев А.А., Суюндиков М.М., Быков П.О. Исследование процесса цементационного осаждения медного порошка // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2013. No. 2. С. 3—7.
13. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. Morphology of copper powder produced by electrospark dispersion from waste // Russ. Eng. Res. 2014. Vol. 34. No. 11. P. 694—696.
14. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. Morphology and composition of copper electrospark powder suitable for sintering // Russ. Eng. Res. 2015. Vol. 35. No. 1. P. 33—35.
15. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M., Malukhov V.S. Production of copper electroerosion nanopowders from wastes in kerosene medium // J. Nano- and Electron. Phys. 2014. Vol. 3. P. 03011-1—03011-3.

References

1. Kolmykov D.V. Vosstanovlenie i uprochnenie detalei avtomobilei gal'vanicheskimi pokrytiyami [Restoration and strengthening of parts of automobiles galvanic coatings]. *Glavnii mekhanik*. 2010. No. 10. P. 33—38.
2. Serebrovsky V.V., Safronov R.I. Vosstanovlenie i uprochnenie detalei mashin gal'vanicheskimi pokrytiyami [The restoration and hardening of machine parts galvanic coatings]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyaistva*. 2007. No. 1. P. 18—19.
3. Yudin V.M. Vosstanovlenie detalei sel'skohozyaistvennikh mashin gal'vanicheskimi pokrytiyami na osnove tsinka [The restoration of parts of agricultural machinery galvanic coatings based on zinc]. *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2009. Vol. 16. No. 1. P. 24—25.
4. Vinogradova S.S., Kaidrikov R.A., Zhuravlev B.L. Elektrohimiicheskie metodi kontrolya korrozionnoi stoikosti mnogoslainikh gal'vanicheskikh pokrytii [Electrochemical methods of controlling corrosion resistance of multilayer electroplating]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2006. No. 3. P. 116—120.
5. Vinogradova S.S., Kaidrikov R.A., Zhuravlev B.L. Razvitiye elektrohimiicheskih metodov otsenki korrozionnoi stoikosti mnogoslainikh gal'vanicheskikh pokrytii [Development of electrochemical methods for the assessment of corrosion resistance of multilayer electroplating]. *Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya*. 2008. No. 7. P. 39—42.

6. Yudin V.M., Vikharev M.N., Filina N.N. Vosstanovlenie detalей gal'vanicheskimi pokrytiyami na osnove tsinka pri bol'shikh plotnostyakh toka [Restoration parts galvanic coatings based on zinc at high current densities]. *Trudy GOSNITI*. 2012. Vol. 110. No. 2. P. 58–60.
7. Proskurkin E.V., Sukhomlin D.A. Analiz tsinkovikh pokrytii na osnove ikh strukturnikh i elektrokhimicheskikh svoystv [Analysis of zinc coatings on the basis of their structural and electrochemical properties of]. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2013. No. 10. P. 30–38.
8. Malyshev V.V., Gab A.I. Visokotemperaturnye gal'vanicheskie pokrytiya molibdena, vol'frama i ikh karbidov iz ionnykh rasplavov [High-temperature galvanic coating of molybdenum, tungsten and their carbides of ionic melts]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 213–217.
9. Kireev S.Yu., Perelygin Yu.P. Teoriya, metody izmereniya i oblast' primeneniya perekhodnogo soprotivleniya gal'vanicheskikh pokrytii [Theory, measurement methods and scope of the transition resistance of galvanic coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2010. Vol. XVIII. No. 4. P. 19–26.
10. Dorofeev Yu.G., Lipkin M.S., Naumenko A.A., Rybalko E.A., Sirotnin P.V., Ivashin I.N., Lipkin V.M. Poluchenie mednykh poroshkov iz ammiakatnykh elektrolitov i ikh svoystva [Obtaining copper powders of amiatex electrolytes and their properties]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2012. No. 3. P. 3–7.
11. Zolotukhina L.V., Kuznetsov M.V., Gel'chinskii B.R., Zhidovina S.V., Arefyev I.G. Issledovanie poverkhnosti chastits ul'tradispersnykh mednykh poroshkov, poluchennykh sposobom gazofaznoi kondensatsii [Surface investigation of ultrafine particles of copper powders obtained by the method of gas-phase condensation]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2011. No. 1. P. 14–20.
12. Artamonov V.V., Artamonov V.P., Perekopnaya E.Yu., Abishev A.A., Suyundikov M.M., Bykov P.O. Issledovanie protsessa tsementatsionnogo osazhdeniya mednogo poroshka [The study of the cementation process of deposition of copper powder]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2013. No. 2. P. 3–7.
13. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. Morphology of copper powder produced by electrospark dispersion from waste. *Russ. Eng. Res.* 2014. Vol. 34. No. 11. P. 694–696.
14. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M. Morphology and composition of copper electrospark powder suitable for sintering. *Russ. Eng. Res.* 2015. Vol. 35. No. 1. P. 33–35.
15. Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova N.M., Malukhov V.S. Production of copper electroerosion nanopowders from wastes in kerosene medium. *J. Nano- and Electron. Phys.* 2014. Vol. 3. P. 03011-1–03011-3.