

УДК 669

DOI 10.17073/1997-308X-2015-1-71-76

Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали

© 2015 г. **Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, В.Ю. Карпенко**

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

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

*Статья поступила в редакцию 05.06.2014 г., доработана 16.10.14 г., подписана в печать 22.10.14 г.***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, проф., зав. кафедрой технологий и оборудования металлургических производств МАМИ (111127, г. Москва, ул. Лефортовский вал, 26). Тел.: (495) 267-58-10. E-mail: latipov46@mail.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.**Алтухов А.Ю.** — канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования ЮЗГУ. Тел.: (4712) 50-48-15. E-mail: alt997@yandex.ru.**Карпенко В.Ю.** — аспирант, препод. кафедры автомобилей, транспортных систем и процессов ЮЗГУ. E-mail: omegav@rambler.ru.

Представлен анализ характеристик износостойкости электроискровых покрытий, нанесенных с использованием электродного материала из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали. Электроды для электроискрового легирования изготовлены методом горячего прессования (с пропусканием высокоамперного тока в вакууме при температуре 950 °С в течение 3 мин) порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали марки Р6М5. Электроискровые покрытия с применением этих электродов формировали на образцах из стали 30ХГСА с помощью установки UR-121. Коэффициент трения и скорость износа поверхности образца и контртела измеряли на автоматизированной машине трения «Tribometer» (CSM Instruments, Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания «шарик–диск».

Ключевые слова: отходы быстрорежущей стали, электроэрозионное диспергирование, порошок, электроискровое легирование, характеристики износостойкости.

Characteristics of wear resistance of electrospark coatings deposited using the electrode material made of electroerosion powders of high-speed steel are analyzed. Electrodes for electrospark alloying are fabricated by hot compaction (with the passage of a high-amperage current in vacuum at 950 °C for 3 min) of the powder fabricated by electroerosion dispersing of waste of high-speed steel R6M5. Electrospark coatings with the application of these electrodes were formed on the samples made of steel 30KhGSA using an UR-121 installation. The friction coefficient and wear rate of the sample surface and counterbody were measured using a computer-aided automated friction machine «Tribometer» (CSM Instrument, Switzerland) according to the standard «ball–drive» testing layout.

Keywords: high-speed steel waste, electroerosion dispersing, powder, electrospark alloying, wear characteristics.

Введение

В настоящее время для получения на металлических поверхностях покрытий многофункционального назначения одним из перспективных является метод электроискрового легирования (ЭИЛ). Основными электродными материалами в основном служат спеченные твердые сплавы, стоимость которых, ввиду присутствия дорогостоящего вольфрама, относительно высока. Для решения данной проблемы в качестве электродного материала предлагаются порошки быстрорежущих сталей (БРС).

Анализ исследовательских работ в области БРС [1–7] показывает, что в большинстве из них рассматриваются вопросы экономии содержащегося в сталях вольфрама, что весьма актуально из-за дефицита, дороговизны и непрерывного расширения сфер его применения. С экономией вольфрама тесно связаны мероприятия по сбору отходов БРС и их переработке.

Метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) в настоящее время — один из наиболее перспективных для получения порошков из практи-

чески любого токопроводящего материала и отличается относительно невысокими энергетическими затратами, безвредностью и экологической чистотой процесса, отсутствием механического износа оборудования, возможностью непосредственного измельчения кусков твердого сплава различной формы за одну операцию, достижением преимущественно сферической формы частиц размером от нескольких нанометров до сотен микрометров [8–14].

Исходя из вышесказанного следует, что рассмотрение проблемы переработки и повторного использования отходов БРС требует решения ряда взаимосвязанных научных задач теоретического и экспериментального характера, что и определяет актуальность и научную ценность исследований в данном направлении.

Для разработки технологий повторного применения порошков БРС, полученных из отходов, и оценки эффективности их использования необходимо проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью настоящей работы являлась оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с помощью электродного материала из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали.

Методика исследований

Для переработки отходов БРС использовали установку для ЭЭД токопроводящих материалов [15]. Процесс ЭЭД представляет собой разрушение токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами. Под действием разрядов происходит ионизация рабочей жидкости в промежутке, через который начинает протекать электрический ток, т.е. образуется канал разряда — сравнительно узкая цилиндрическая область, заполненная нагретым веществом (плазмой), содержащим ионы и электроны. Длина канала и его диаметр очень малы, и поэтому плотность энергии в нем достигает больших величин, а температура в этом локальном объеме — десятков тысяч градусов.

Отходы загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью — дистиллированной водой, процесс проводили при следующих электрических

параметрах: емкость разрядных конденсаторов — 35 мкФ, напряжение — 200–220 В, частота следования импульсов — 30 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами происходило разрушение материала отходов с образованием дисперсных частиц порошка.

Электроды для электроискрового легирования изготавливали методом горячего прессования с пропусканием высокоамперного тока в вакууме при температуре 950 °С в течение 3 мин из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали марки Р6М5. В основе процесса лежит модифицированный метод горячего прессования, при котором электрический ток пропускается непосредственно через пресс-форму и прессуемую заготовку, а не через внешний нагреватель. С помощью импульсного электротока и так называемого эффекта плазмы искрового разряда (spark plasma effect) достигаются очень быстрый нагрев и исключительно малая продолжительность рабочего цикла. Это позволяет подавить рост зерна и достичь равновесного состояния, что открывает возможности для создания новых материалов с ранее недоступными композициями и свойствами, материалов с субмикронным или наномасштабным зерном, а также композитных материалов с уникальными или необычными композициями.

Электроискровые покрытия, сформированные такими электродами, на образцах из стали 30ХГСА получали на установке UR-121 (производство фирмы ПЭЛМ, г. Подольск).

Коэффициент трения и интенсивность износа поверхности образца и контртела измеряли на автоматизированной машине трения «Tribometer» (CSM Instruments, Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания «шарик–диск». Эти испытания позволяют использовать модель Герца, соответствуют международным стандартам ASTM G99-959 DIN50324 и могут служить для оценки износостойкости образца и контртела.

Образец устанавливали в держателе, перпендикулярно плоскости образца закрепляли стержень, на конце которого находился шарик диаметром 6 мм из стали «Stainless Steel AISI 420» (твёрдость по Виккерсу 5000–8000 HV). С помощью регу-

лировки датчика перемещения выбирали радиус кривизны поверхности износа. Еще один датчик компенсировал силу трения и позволял определить значение коэффициента трения в заданный момент времени.

Подготовка к испытанию включала:

а) три вида калибровки:

- скорости вращения мотора;
- тангенциального смещения датчика;
- радиуса кривизны поверхности износа;

б) установку параметров испытания с помощью специального программного обеспечения (программа «Instrum X for Tribometer»). Задавалась следующая необходимая для испытания информация:

- частота опроса датчика;
- данные об окружающей среде (температура, влажность);
- величина нагрузки, при которой будет проводиться испытание, Н;
- линейная скорость, см/с;
- длина пробега, м, или количество циклов;
- информация о подложке (материал покрытия, материал подложки, вид предварительной очистки образца перед испытанием);
- информация о контртеле (материал покрытия, материал контртела, вид предварительной очистки контртела перед испытанием, размер, геометрия).

Испытания проводили на воздухе при нагрузке 5 Н и линейной скорости 10 см/с, с радиусом кривизны поверхности износа 5–9 мм, путь трения составлял 100, 200 и 500 м.

Интенсивность износа образца и статистического партнера (шарика) 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 поверхности образца с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра «Surtronic 25» (производство фирмы «Taylor Hobson», Великобритания):

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

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

Состояние поверхностей трения изучали с использованием оптического инвертированного микроскопа «Olympus GX 51», оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab», и электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 200 3D» (Нидерланды).

Результаты и их обсуждение

Оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов (электроискровых покрытий на основе БРС и подложки из стали 30ХГСА) представлено на рис. 1.

Установлено (см. рис. 1, а–в), что после многократных проходов контртела (шарика) по исследуемой поверхности экспериментальных образцов с ЭИЛ-покрытиями из БРС на соответствующем пути трения происходит налипание продуктов изнашивания образца на контртело ($l = 100 \div 200$ м), а также, помимо налипания, частичный износ контртела ($l = 500$ м).

В случае, когда испытываемой была поверхность подложки из стали 30ХГСА (рис. 1, г–е), наблюдалось интенсивное изнашивание контртела ($l = 100, 200$ и 500 м).

Результаты трибологических испытаний образцов при различных путях трения показаны на рис. 2. Видно, что у образцов с ЭИЛ-покрытиями на основе БРС, по сравнению с образцами из стали 30 ХГСА, коэффициент трения (μ) больше. Также отмечено, что при испытаниях трибологических образцов с БРС происходит скачок. В данном случае это связано с высокой шероховатостью ($R_a =$

= 2,14 мкм), а износ характеризуется сглаживанием твердых выступов поверхности образца.

Значения коэффициента трения (μ) и интенсивности износа (W), полученные при испытаниях, приведены в таблице.

Проведенный анализ характеристик износостойкости исследуемых образцов показал,

что при испытаниях поверхности из стали 30ХГСА в паре с контртелом последнее изнашивается интенсивнее. Это связано с тем, что материал контртела — сталь «Stainless Steel AISI 420» — упрочнена карбидами хрома, которые при трении изнашивают само контртело и поверхность стали 30ХГСА.

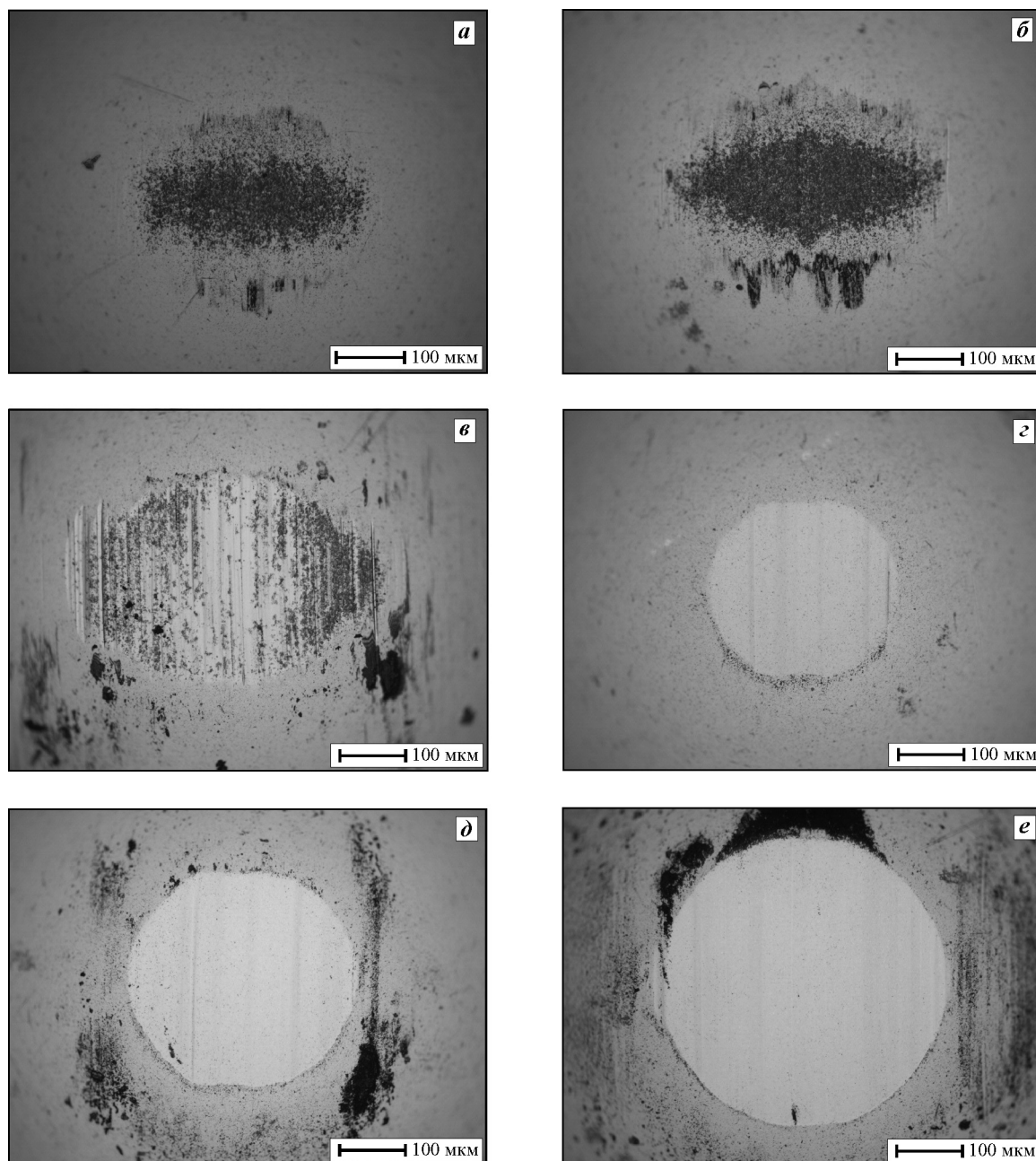


Рис. 1. Оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов
а–в — электрохромные покрытия на основе БРС; *г–е* — подложки из стали 30ХГСА
l, м: 100 (*а, г*), 200 (*б, д*), 500 (*в, е*)

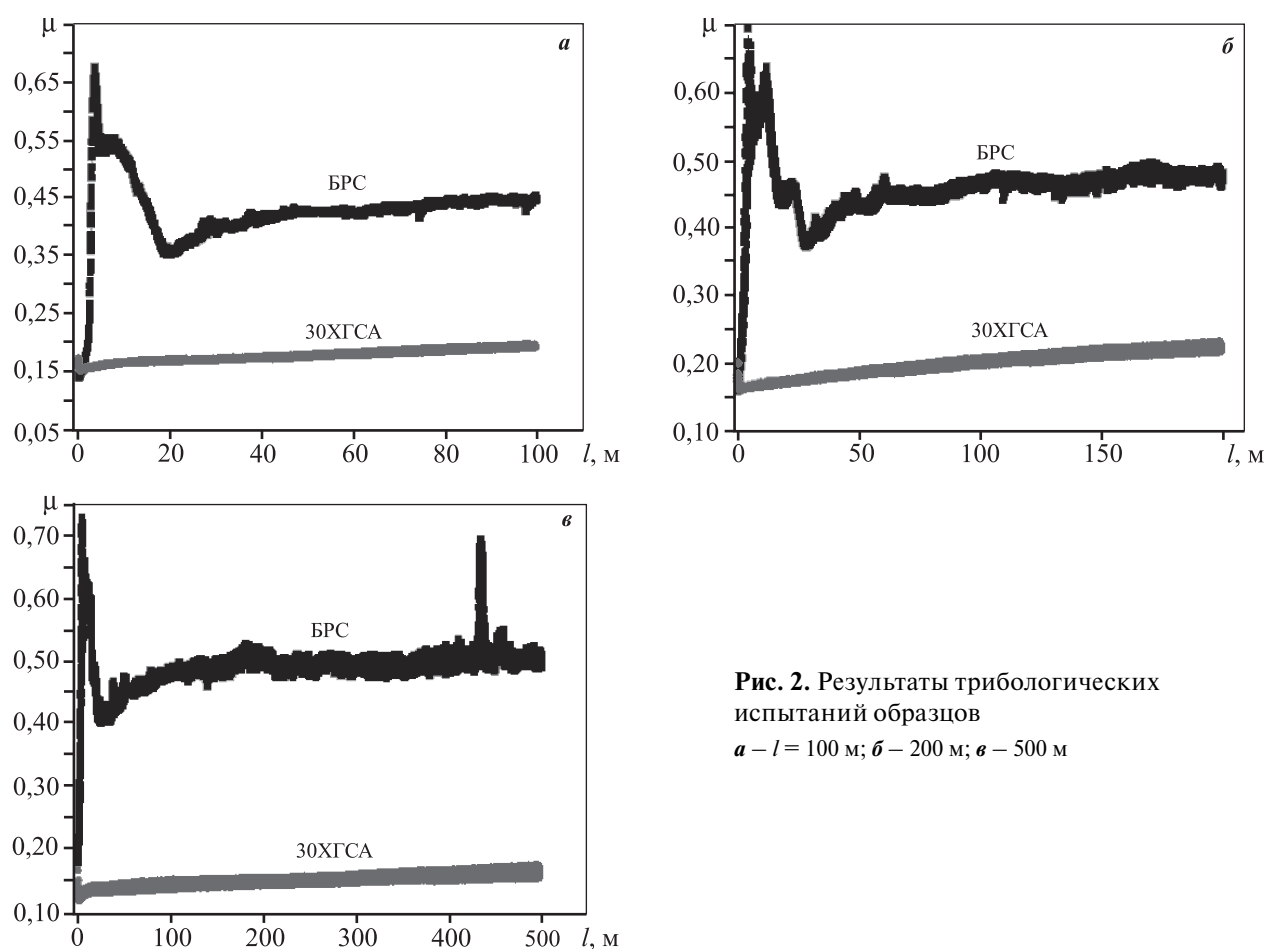


Рис. 2. Результаты трибологических испытаний образцов
a – $l = 100$ м; *б* – 200 м; *в* – 500 м

**Трибологические характеристики исследуемых покрытий
 (материал контртела – сталь «Stainless Steel AISI 420»)**

$l, \text{ м}$	Коэффициент трения (μ)					$W, \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	
	Начальный	Минимальный	Максимальный	Средний	Среднее отклонение	Контртело	Образец
Образцы из стали 30XGCA							
100	0,145	0,143	0,633	0,426	0,061	$3,671 \cdot 10^{-6}$	$1,168 \cdot 10^{-6}$
200	0,184	0,176	0,611	0,457	0,046	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$1,978 \cdot 10^{-7}$
500	0,207	0,191	0,629	0,486	0,034	$5,34 \cdot 10^{-7}$	$2,62 \cdot 10^{-7}$
Покрyтия из БРС							
100	0,173	0,156	0,194	0,179	0,010	$3,788 \cdot 10^{-11}$	0
200	0,199	0,162	0,221	0,197	0,017	$3,24 \cdot 10^{-7}$	0
500	0,162	0,118	0,162	0,146	0,008	$1,595 \cdot 10^{-7}$	0

В случае контакта поверхности образцов с ЭИЛ-покрытиями из БРС с таким же контртелом твердые выступы (шероховатость) на поверхности этих образцов являются ловушками для карбидов хрома, задерживают их и происходят сглаживание шероховатости и перенос материала образца на контртело.

Заключение

На основании выполненного анализа характеристик износостойкости на максимальном пути трения 500 м электроискровых покрытий, полученных с помощью электродного материала из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали марки Р6М5, установлено следующее:

— среднее значение коэффициента трения образцов из стали марки 30ХГСА и электроискровых покрытий на основе БРС составляет 0,486 и 0,146 соответственно;

— интенсивность износа статистического партнера (контртела) при трении по стали 30ХГСА и ЭИЛ-покрытию с БРС составляет $5,34 \cdot 10^{-7}$ и $1,595 \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н·м) соответственно;

— интенсивность износа образцов из стали 30ХГСА и ЭИЛ-покрытий с БРС составляет $2,62 \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н·м) и 0 соответственно.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых — кандидатов наук (код проекта МК-3224.2015.8).

Литература

1. Kremnev L.S. // Steel Transl. 2009. Vol. 39, № 12. P. 1111.
2. Li Z., Liu X., Zhao J. et al. // Surf. Coat. Technol. 2000. Vol. 131, № 1–3. P. 579.
3. Uglov V.V., Kholmetskii A.L., Kuleshov A.K. et al. // Ibid. 2002. Vol. 158–159. P. 349.
4. Xu L., Xing J., Wei S. et al. // Wear. 2007. Vol. 262, № 3–4. P. 253.
5. Shtremel' M.A., Karabasova L.V., Chizhikov V.I., Vodenikov S.I. // Металловедение и терм. обраб. металлов. 1999. № 4. P. 16.
6. Ghomashchi M.R. // Acta Mater. 1998. Vol. 46, № 14. P. 5207.
7. Li Y., Zhang G., Yao J. et al. // Chin. J. Mater. Res. 2005. Vol. 19, № 6. P. 613.
8. Ageev E.B. // Загот. пр-ва в машиностроении. 2011. № 2. С. 42.
9. Ageev E.B. // Упроч. технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 13.
10. Ageev E.B. // Технол. металлов. 2011. № 7. С. 30.
11. Ageeva E.V. // J. Nano- and Electron. Phys. 2013. Vol. 5, № 4. P. 04038.
12. Ageev E.V. // Ibid. 2014. Vol. 3. P. 03001-1.
13. Ageeva E.V. // Ibid. P. 03011-1.
14. Ageev E.V. // Ibid. P. 03049-1.
15. Пат. 2449859 (РФ). Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Е.В. Агеев. 2012.