

УДК 621.762

**Е.В. Агеева**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

**Е.П. Новиков**, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: evgeniy-novikov-92@mail.ru)

**Н.А. Пивовар**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия им. И.И. Иванова» (Курск, Россия) (e-mail: pivovar-na@yandex.ru)

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ГОЛОВОК БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ**

*Восстановление дефектных деталей позволяет значительно снизить затраты на ремонт автомобилей и повысить надежность восстановленных деталей. Опыт передовых предприятий показывает, что восстановление дефектных деталей современными прогрессивными технологиями позволяет значительно сократить простои техники, увеличить межремонтный срок службы, уменьшить расход запасных частей.*

*В настоящее время одним из перспективных методов восстановления дефектных деталей автомобилей является газодинамическое напыление. Одной из проблем использования технологии газодинамического напыления является цена и качество применяемых порошковых материалов. Одними из перспективных и промышленно не применяемых являются порошковые материалы, получаемые из токопроводящих отходов электроэрозионным диспергированием [9]. Однако эти материалы не применялись до настоящего времени в технологиях восстановления дефектных деталей автомобилей газодинамическим напылением, в том числе и головок блока цилиндров.*

*Целью настоящей работы являлось исследование и сравнение рентгеноструктурного анализа газодинамических покрытий головок блоков цилиндров, полученных методом газодинамического напыления с использованием стандартного порошкового материала марки А-20-11, и экспериментального (электроэрозионного) порошкового материала.*

*Представлен процесс восстановления рабочих поверхностей, дефектных головок блоков цилиндров двигателя ЗМЗ-406, методом газодинамического напыления, а также сравнение рентгеноструктурного анализа газодинамических покрытий головок блоков цилиндров, полученных с использованием электроэрозионного порошкового материала и стандартного порошкового материала марки А-20-11.*

*Экспериментально установлено, что основными фазами покрытий с использованием стандартного порошкового материала являются Al, Zn, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а основными фазами покрытий с использованием электроэрозионного порошкового материала являются Al, Al(OH)<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Данные порошковые материалы можно использовать при восстановлении широкой номенклатуры дефектных автомобильных деталей.*

**Ключевые слова:** головка блока цилиндров, дефект, электроэрозионное диспергирование, газодинамическое напыление, порошковый материал.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-1-78-85

**Ссылка для цитирования:** Агеева Е.В., Новиков Е.П., Пивовар Н.А. Сравнительный рентгеноструктурный анализ газодинамических покрытий головок блоков цилиндров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 1(76). С. 78-85.

\*\*\*

### **Введение**

Развитие современного машиностроения требует повышения качества, надежности и долговечности деталей, узлов и механизмов. Одним из эффективных путей решения этих задач является применение различных функциональных

покрытий, полученных методом газодинамического напыления, к достоинствам которого относятся простота процесса, высокая адгезия покрытий, низкая энергоемкость и высокая экологичность.

Восстановление дефектных деталей позволяет значительно снизить затраты на ремонт автомобилей и повысить

надежность восстановленных деталей. Опыт передовых предприятий показывает, что восстановление дефектных деталей современными прогрессивными технологиями позволяет значительно сократить простой техники, увеличить межремонтный срок службы, уменьшить расход запасных частей [1-10].

В настоящее время одним из перспективных методов восстановления дефектных деталей автомобилей является газодинамического напыления. Одной из проблем использования технологии газодинамического напыления является цена и качество применяемых порошковых материалов. Одними из перспективных и промышленно не применяемых являются порошковые материалы, получаемые из токопроводящих отходов электроэрозионным диспергированием [9]. Однако эти материалы не применялись до настоящего времени в технологиях восстановления дефектных деталей автомобилей газодинамическим напылением, в том числе и головок блока цилиндров.

**Целью настоящей работы** являлось исследование и сравнение рентгеноструктурного анализа газодинамических покрытий головок блоков цилиндров, полученных методом газодинамического напыления с использованием стандартного порошкового материала марки А-20-11 и экспериментального (электроэрозионного) порошкового материала.

#### **Материалы и методы исследования**

Одним из перспективных способов получения порошковых материалов, для восстановления дефектных головок блоков цилиндров автомобилей, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и отходов алюминия, является метод электроэрозионного диспергирова-

ния, отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса [11-18].

Для получения алюминиевого порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали алюминиевую проволоку ГОСТ 14838-78, предварительно нарезанную по 5-7 см. Проволоку загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной водой. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 100 В, частота импульсов 140 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение материала с образованием дисперсных частиц порошка.

Напыление порошкового материала производилось при следующих режимах установки ДИМЕТ – 404:

- давление воздуха (по манометру на МПВ-К на стойке) – 5,0 кгс/см<sup>2</sup>;
- температурный режим №3 (положение переключателя «температурный режим»);
- расход порошка – 0,2 г/с.

В результате чего было получено два образца:

- образец со стандартным порошковым материалом был получен на поверхности головки блока цилиндров автомобильного двигателя ЗМЗ-406 методом газодинамического напыления с использованием стандартного порошкового материала марки А-20-11;

- образец с экспериментальным покрытием был получен на поверхности головки блока цилиндров автомобильного двигателя ЗМЗ-406 методом газодинамического напыления с использованием алюминиевого электроэрозионного по-

рошкового материала, полученного методом электроэрозионного диспергирования при следующих параметрах установки: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 100 В, частота импульсов 140 Гц.

Исследование фазового состава газодинамических покрытий проводили методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Ultima IV в излучении Cu-K $\alpha$  (длина волны  $\lambda = 0.154178$  нм) с использованием щелей Соллера. Съёмку дифракционного спектра для фазового анализа проводят по схеме  $\theta$ -2 $\theta$  сканирования с фокусировкой по Брегу-Брентано в интервале углов 5 – 100 град. 2  $\theta$ . Съёмку осуществляют в поточечном режиме с шагом сканирования  $\Delta(2\theta) = 0,02$  град, скоростью 0,6 град/мин, рабочее напряжение 45 кВ, ток 200 мА. Для уточнения профиля экспериментальных рентгенограмм использовали программный пакет PDXL RIGAKU. Вычитание фона проводили методом Сонневельда – Виссера, сглаживание экспериментального профиля методом Савицкого – Голая, разделение компонент  $ka_1$  и  $ka_2$  методом Рачингера. Для описания дифракционных максимумов использовали суперпозицию функции Гаусса и функции Лоренца. Аппроксимация каждого из рефлексов на дифрактограммах исследуемых газодинамических покрытий функцией псевдо – Войгта позволила точно определить положение рефлексов с учетом смещения, вызванного перекрытием рефлексов, на половине максимума интенсивности (FWHM) и интенсивность. Фазовый состав покрытий определяли с помощью БД ICDD PDF-2 (2014).

Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV применяется для исследования фазового анализ проб, количественного

фазового анализ проб, определения областей когерентного рассеяния и микронапряжений, а также для текстурного анализа.

Особенностью дифрактометра серии Ultima IV является:

- радиус гониометра 185 мм на выходной пучок;

- щели переменной ширины, что позволяет сохранять неизменной облучаемую поверхность образца;

- $\Theta/\Theta$  гониометр вертикального типа для всех трех конфигураций, адаптированный для установки широкого набора дополнительных оптических компонентов;

- новая модель высокоскоростного рентгеновского детектора D/teX Ultra позволяет проводить во 100 раз более высокоскоростные измерения по сравнению с предыдущими детекторами этой фирмы. Это детектор высокой скорости счета, высокого энергетического уровня разрешения и низкого уровня шума;

- многофункциональная приставка для анализа текстур и остаточных напряжений с поворотными столиками / Multi purpose attachment MPA-IV  $\chi(kai)$ -  $\phi(phi)$  – Z stage. Автосменщик образцов (10 кювет). Программное обеспечение: качественный и количественный фазовый анализ, база данных дифрактограмм ICDD PDF-2, анализ кристалличности, анализ остаточных напряжений, построение прямых и обратных полюсных фигур, функция распределения ориентировок.

Технические характеристики рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV представлены в таблице 1.

#### **Результаты экспериментальных исследований**

Результаты исследований рентгеноструктурного анализа газодинамических покрытий головок блоков цилиндров, по-

лученных методом газодинамического напыления с использованием стандартного порошкового материала марки А-20-11

и экспериментального (электроэрозионного) порошкового материала представлены ниже на рисунках 1,2 и в таблицах 2,3.

Таблица 1

## Технические характеристики Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV

Параметр	Описание
Источник излучения	Малогобаритный с использованием высокочастотного преобразователя, максимальная мощность – 3кВт, напряжение на трубке – 20-60кВ, ток трубки – 2-60мА, материал анода трубки – Cu , размер фокуса - 0.4 x 12мм
Гониометр	Θ/Θ вертикального типа, образец неподвижен. Метод сканирования – независимое сканирование каждой оси Θs или Θd; режим сканирования со связанными осями Θs/Θd. Радиус гониометра – 185мм; диапазон углов сканирования в режиме связанных осей Θs/Θd от – 30 до +1620(2Θ); оси Θs от – 1.50 до +810, оси Θd от –950 до +1200; шаг сканирования для оси Θs или Θd 0,0001 – 60; в режиме связанных осей 0,0002 – 120(2Θ). Скорость сканирования в режиме связанных осей Θs/Θd 0.020~1000 (2Θ), независимо каждой оси 0.010~500; скорость позиционирования 5000/мин (2Θ)
Щели	С управляемой шириной на выходной и дифрагированный пучок. Два стандартных комплекта щелей Соллера для работы в фокусирующей геометрии и геометрии псевдопараллельного пучка
Юстировка	Полностью автоматическая для гониометра, амплитудного дискриминатора, счетчика, оптических узлов и дополнительных приставок
Детектор	Сцинтилляционный счетчик с линейностью 700000имп. (стандарт), однокоординатный полупроводниковый детектор D/teX Ultra с чувствительностью, превышающей чувствительность сцинтилляционного счетчика на два порядка

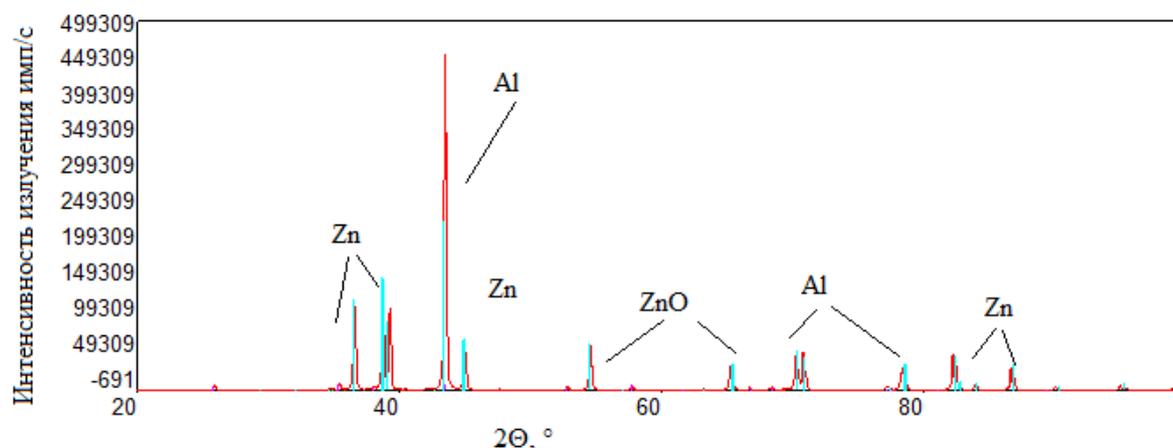


Рис. 1. Фазовый состав покрытия, полученного с использованием стандартного порошкового материала

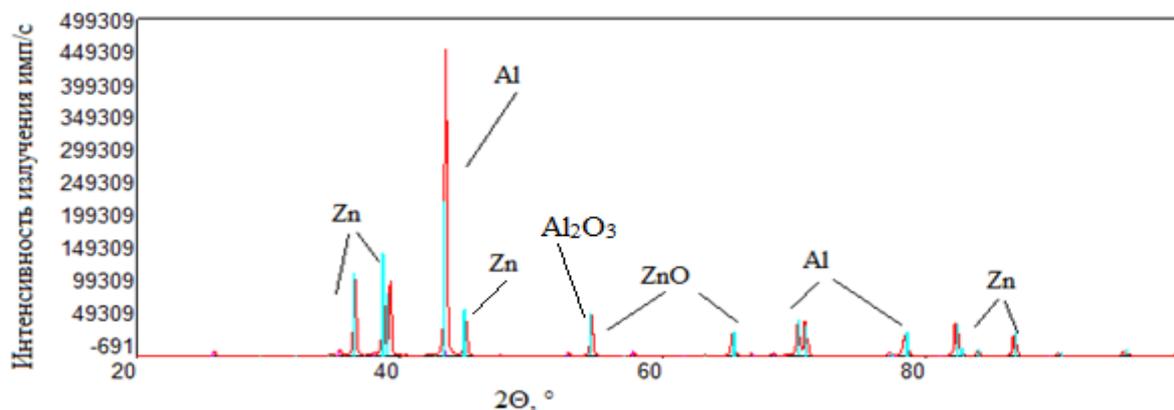


Рис. 2. Фазовый состав покрытия, полученного с использованием экспериментального порошкового материала

Таблица 2

Параметры решеток газодинамического покрытия  
со стандартным порошковым материалом

Наименование	Химическая формула	Параметры кристаллической решетки, нм	Тип кристаллической решетки
Алюминий	Al	a = 4.03127; b = 4.03127; c = 4.03127	Кубическая кристаллическая решётка
Цинк	Zn	a = 2.656542; b = 2.656542; c = 4.921967	Гексагональная кристаллическая решётка
Оксид цинка	ZnO	a = 3.222706; b = 3.222706; c = 5.185404	Гексагональная кристаллическая решётка
Корунд	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	a = 4.832389; b = 8.339462; c = 8.339462.	Орторомбическая кристаллическая решётка

Таблица 3

Параметры решеток газодинамического покрытия  
с экспериментальным порошковым материалом

Наименование	Модификация	Химическая формула	Параметры кристаллической решетки, нм	Тип кристаллической решетки
Алюминий		Al	a = 4.049255; b = 4.049255; c = 4.049255	Кубическая кристаллическая решётка
Гидроксид алюминия (III)	Байерит	Al(OH) <sub>3</sub>	a = 5.056874; b = 8.662219; c = 4.708227	Моноклинная кристаллическая решётка
Корунд		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	a = 4.738979; b = 4.738979; c = 12.93776	Тригональная кристаллическая решётка

## Заключение

В результате исследования и сравнения рентгеноструктурного анализа газодинамических покрытий головок блоков цилиндров, полученных методом газодинамического напыления с использованием стандартного порошкового материала и экспериментального (электроэрозионного) порошкового материала было установлено, что основными фазами покрытий с использованием стандартного порошкового материала являются Al, Zn, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а основными фазами покрытий с использованием электроэрозионного порошкового материала являются Al, Al(OH)<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Данные порошковые материалы можно использовать при восстановлении широкой номенклатуры дефектных автомобильных деталей.

## Список литературы

1. Логинов П.К., Ретюнский О.Ю. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей: учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 217 с.
2. Новиков А.Н., Стратулат М.П., Севостьянов А.Л. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей. Орел: ОрелГТУ, 2006. 332 с.
3. Новиков А.Н., Бакаева Н.В. Восстановление и упрочнение деталей машин, изготовленных из алюминиевых сплавов, электрохимическими способами автомобилей. Орел: ОрелГТУ, 2004. 171 с.
4. Новиков А.Н., Катунин А.А., Тебекин М.Д. Современные способы стендовых испытаний шаровых шарниров // Мир транспорта и технологических машин. 2010. № 4 (31). С. 27-34.
5. Сравнение систем определения местоположения и их применение в интеллектуальных транспортных системах / А.Н. Новиков, А.А. Катунин, А.В. Кулев, М.В. Пешехонов // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 2 (41). С. 109-113.

6. Пузанков А.Г. Автомобили: Устройство автотранспортных средств. М.: Академия, 2012. 560 с.

7. Ли Р. И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. 379 с.

8. Алхимов А.П., Клинков С.В. Холодное газодинамическое напыление: теория и практика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 536 с.

9. Агеев Е.В. Теоретические и нормативные основы технической эксплуатации автомобилей. Курск, 2008. 195 с.

10. Агеев Е.В., Агеева Е.В. Теоретические аспекты технической эксплуатации автомобилей. Курск, 2013. 154 с.

11. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Хорьякова Н.М. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием. Курск, 2014. 144 с.

12. Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 13-16.

13. Агеев Е.В., Латыпов Р.А. Восстановление и упрочнение деталей автотракторной техники порошками, полученными электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов // Международный научный журнал. 2011. № 5. С. 103-106.

14. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Чернов, Г.С. Маслов, Е.И. Паршина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85-90.

15. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. Исследование микротвердости порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинже-

нерный университет им. В.П. Горячкина. 2011. № 1 (46). С. 78-80.

16. Получение заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.Ю. Карпенко, А.С. Осминина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 24-27.

17. Production of copper electroerosion nanopowders from wastes in kerosene medium / Ageeva E.V., Ageev E.V., Horyakova

N.M., Malukhov V.S. // Журнал нано- и электронной физики. 2014. Т. 6. № 3. С. 3011-1-3011-3.

18. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2014, vol. 55, no. 6, pp. 577-580.

*Поступила в редакцию 09.01.18*

UDC 621.762

**E.V. Ageeva**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

**E.P. Novikov**, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: evgeniy-novikov-92@mail.ru)

**N.A. Pivovarov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kursk State Agricultural Academy named after I.I. Ivanov " (Kursk, Russia) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

#### COMPARATIVE X-RAY ANALYSIS OF GAS-DYNAMIC COATINGS OF HEADS OF CYLINDER BLOCKS

*Recovering defective parts can significantly reduce the cost of repairing cars and improve the reliability of the restored parts. The experience of leading enterprises shows that restoration of defective parts using modern advanced technologies makes it possible to reduce significantly the downtime of equipment, increase the overhaul life, and reduce the consumption of spare parts.*

*At present, one of the most promising methods for repairing defective parts of cars is gas-dynamic spraying. One of the problems of gas-dynamic spraying technology is its price and quality of powder materials used. One of the promising and industrially not widely used materials are powder materials obtained from current-conducting waste by electrospark dispersion [9]. However, these materials have not been used so far in technologies for car defective parts recovery by gas-dynamic spraying, including the heads of the cylinder block.*

*The aim of this work was to study and compare the X-ray diffraction analysis of gas-dynamic coatings of the heads of cylinder blocks obtained by gas-dynamic spraying using standard powder material of grade A-20-11 and the experimental (electrospark) powder material.*

*The process of restoration of working surfaces, defective heads of engine blocks ZMZ-406, by gas-dynamic spraying, as well as comparison of X-ray analysis of gas-dynamic coatings of cylinder heads obtained using an electrospark powder material and standard powder material of grade A-20-11 is presented.*

*It has been experimentally established that the main phases of coatings using a standard powder material are Al, Zn, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and the main phases of coatings using an electrospark powder material are Al, Al (OH)<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. These powder materials can be used to restore a wide range of defective automotive parts.*

**Key words:** cylinder block head, defect, electrospark dispersion, gas-dynamic spraying, powder material.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-1-78-85

**For citation:** Ageeva E.V., Novikov E.P., Pivovarov N.A. Comparative X-Ray Analysis of Gas-Dynamic Coatings of Heads of Cylinder Blocks. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 1(76), pp. 78-85 (in Russ.).

\*\*\*

#### Reference

1. Loginov P.K., O.Yu. Retyunskij Sposoby i texnologicheskie processy voss

tanovleniya iznoshennyx detalej. Tomsk, Tomskij politexnicheskij universitet Publ., 2010, 217 p.

2. Novikov A.N., Stratulat M.P., Sevostyanov A.L. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej avtomobilej. Orel, 2006, 332 p.

3. Novikov A.N., Bakaeva N.V. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej mashin, izgotovlennyx iz alyuminievyx splavov, elektroximicheskimi sposobami avtomobilej. Orel, 2004, 171 p.

4. Novikov A.N., Katunin A.A., Tebekin M.D. Sovremennye sposoby stendovyx ispytanj sharovyx sharnirov. Mir transporta i texnologicheskix mashin, 2010, no. 4 (31), pp. 27-34.

5. Novikov A.N., Katunin A.A., Kulev A.V., Peshexonov M.V. Sravnenie sistem opredeleniya mestopolozheniya i ix primeneniye v intellektualnyx transportnyx sistemax. Mir transporta i texnologicheskix mashin, 2013, no. 2 (41), pp. 109-113.

6. Puzankov A.G. Avtomobili: Ustrojstvo avtotransportnyx sredstv. Moscow, Akademiya Publ., 2012, 560 p.

7. Li R. I. Texnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalej avtotraktornoj texniki. Lipeck, LGTU Publ., 2014, 379 p.

8. Alximov A.P., Klinkov S.V. Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie: teoriya i praktika. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010, 536 p.

9. Ageev E.V. Teoreticheskie i normativnye osnovy texnicheskoy ekspluatatsii avtomobilej. Kursk, 2008, 195 p.

10. Ageev E.V., Ageeva E.V. Teoreticheskie aspekty texnicheskoy ekspluatatsii avtomobilej. Kursk, 2013, 154 p.

11. Ageev E.V., Ageeva E.V., Xoryakova N.M. Sostav i svojstva mednyx poroshkov, poluchennyx elektroerozionnym dispergirovanijem. Kursk, 2014, 144 p.

12. Ageev E.V., Gadalov V.N., Semenixin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. Rentgenospektralnyj mikroanaliz chastic poroshkov, poluchennyx elektroerozionnym dispergirovanijem tverdogo splava. Up-

rochnyayushhie texnologii i pokrytiya, 2011, no. 2, pp. 13-16.

13. Ageev E.V., Latypov R.A. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej avtotraktornoj texniki poroshkami, poluchennyimi elektroerozionnym dispergirovanijem otxodov tverdyyx splavov. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal, 2011, no. 5, pp. 103-106.

14. Ageev E.V., Ageeva E.V., Chernov A.S., Maslov G.S., Parshina E.I. Opredelenie osnovnyx zakonornostej processa polucheniya poroshkov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2013, no. 1 (46), pp. 85-90.

15. Ageev E.V., Semenixin B.A., Latypov R.A. Issledovanie mikrotverdosti poroshkov, poluchennyx elektroerozionnym dispergirovanijem tverdogo splava. Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet im. V.P. Goryachkina, 2011, no. 1 (46), pp. 78-80.

16. Ageev E.V., Ageeva E.V., Karpenko V.Yu., Osminina A.S. Poluchenie zagotovok tverdogo splava iz poroshkov, poluchennyx elektroerozionnym dispergirovanijem volframsoderzhashchix otxodov. Up-rochnyayushhie texnologii i pokrytiya, 2014, no. 4 (112), pp. 24-27.

17. Ageeva E.V., Ageev E.V., Xoryakova N.M., Malukhov V.S. Production of copper electroerosion nanopowders from wastes in kerosene medium. Zhurnal nano- i elektronnoj fiziki, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 3011-1-3011-3.

18. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014, vol. 55, no.6, pp. 577-580.