

*На правах рукописи*

**КАШФУЛЛИН Артур Миннахматович**

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ**

05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания  
в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2017

Работа выполнена на кафедре технического сервиса и ремонта машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова»

- Научный руководитель: **Щербаков Юрий Васильевич**  
кандидат технических наук, профессор,  
Заслуженный инженер сельского хозяйства РФ
- Официальные оппоненты: **Михальченко Александр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет», профессор кафедры технологии материалов, надежности, ремонта машин и оборудования
- Фаюршин Азамат Фаритович**  
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», доцент кафедры технологии металлов и ремонта машин
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Защита состоится 28 сентября 2017 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 999.177.03. при ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, «ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ», ФГБОУ ВО Казанский ГАУ по адресу: 450001, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34, ауд. 257/3.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ» <http://www.bsau.ru/>

Автореферат разослан «    » июля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор

Мударисов  
Салават Гумерович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В сельскохозяйственном производстве Российской Федерации используют более 115 млн. га пашни. Для поддержания работоспособности сельскохозяйственной техники ежегодно выпускается значительное количество запасных частей. Например, только Рубцовский завод запасных частей, являющийся ведущим производителем запасных частей к почвообрабатывающей технике в Российской Федерации, ежегодно изготавливает более 600 тыс. лемехов, 870 тыс. лап культиваторов, 14 тыс. дисков борон. Для этих целей на заводе за один год расходуется более 16 тыс. т стали 50 Г.

Общая годовая потребность сельского хозяйства России в рабочих органах к плугам составляет 7 млн. лемехов, 3 млн. полевых досок, 2,4 млн. отвалов. Годовые затраты на поддержание техники в работоспособном состоянии, по данным ГОСНИТИ, составляют по плугам 1,2 млрд руб.; по культиваторам – 2,5 млрд руб.; по сеялкам – 2,7 млрд руб.

Увеличение рабочих скоростей, ширины захвата, соответственно массы орудий способствует как уплотнению почвы, так и увеличению нагрузки на рабочие органы почвообрабатывающих машин, что приводит к недостаточной износостойкости и к низкому ресурсу рабочих органов. В связи вышеуказанным, актуальной задачей является проведение работ по созданию износостойких покрытий на рабочих органах почвообрабатывающих машин, для увеличения их ресурса. Анализ способов повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин показал, что одним из перспективных направлений по нанесению износостойких покрытий среди методов газотермического напыления (ГТН) является дуговая металлизация (ДМ) с использованием порошковых проволок (ПП). Простота изменения состава ПП дает возможность получать износостойкие покрытия требуемой системы легирования, что необходимо для варьирования состава покрытий при различных режимах изнашивания. Однако при распылении ПП на типовых режимах происходит выгорание легирующих элементов и насыщение распыляемого металла кислородом из атмосферы. Поэтому необходимо рассмотреть особенности формирования металлизационных покрытий и методы совершенствования технологии их нанесения, позволяющие обеспечить износостойкость покрытий для условий эксплуатации рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Работа выполнена в соответствии с темой научно-исследовательской работы кафедры технического сервиса и ремонта машин Пермской ГСХА. Государственный регистрационный номер темы научных исследований во ВНИИ Центре 01201151686.

**Степень разработанности.** Исследованием процессов, закономерностей и явлений при трении и изнашивании занимались отечественные и зарубежные ученые: И.В. Крагельский; К.Т. Ramesha; В.А. Белый; Г. Фляйшер; М.М. Хрущов; М.А. Бабичев; Д.Б. Берштейн; В.П. Лялякин; А.М. Михальченков; Б.Н. Орлов; В.С. Новиков и др. Вопросам нанесения износостойких покрытий методами газотермического напыления посвящены труды С.А. Зайцева; А.Ф. Фаюрина; М.Ю. Петрова. Их работы в значительной мере способствовали внедрению технологии газотермического напыления для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. Однако, в их исследованиях недостаточно раскрыто влияние состава напыляемых материалов и режимов их нанесения на протекающее при напылении окисление покрытий, определяющее их физико-механические и эксплуатационные свойства, в частности стойкость к ударно-абразивному износу, характерного для условий работы рабочих органов почвообрабатывающих машин.

**Цель работы.** Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе совершенствования технологии дуговой металлизации износостойких покрытий из экономно легированных порошковых проволок.

**Задачи исследований:**

1. Определить оптимальный состав порошковой проволоки и режимы дуговой металлизации износостойких покрытий.

2. Исследовать зависимость физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий от состава порошковой проволоки и режимов дуговой металлизации.

3. Разработать технологический процесс упрочнения рыхлящих лап культиватора стерневого тяжелого и определить его экономическую эффективность.

**Объект исследований.** Металлизационные покрытия на рабочих поверхностях лап культиватора стерневого тяжелого.

**Предмет исследований.** Закономерности физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий от состава порошковой проволоки и режимов дуговой металлизации.

**Методология и методы исследований.** В теоретических исследованиях использованы методы математического моделирования и планирования эксперимента в среде программирования Pascal и программном пакете STATISTICA. Экспериментальные исследования выполнены по стандартным методикам на верифицированном оборудовании и включали в себя: элементный анализ, сканирующую электронную микроскопию, рентгеноструктурный фазовый анализ, испытания по определению адгезионной прочности, пористости, микротвердости и износостойкости покрытий. Для подтверждения результатов исследования проведены эксплуатационные исследования рыхлящих лап культиватора стерневого тяжелого, упрочненных по разработанной технологии.

**Научная новизна основных положений, выносимых на защиту.**

1. Определены оптимальный состав порошковой проволоки по критериям степени окисления распыляемого материала и параметры режима дуговой металлизации по критерию адгезионной прочности напыленных покрытий.

2. Установлена степень окисления металлизационных покрытий из порошковой проволоки и определены физико-механические и эксплуатационные показатели.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Установлена зависимость физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий от состава порошковых проволок и режимов дуговой металлизации. Предложен состав порошковой проволоки для нанесения покрытий стойких к абразивному износу дуговой металлизацией. Разработан технологический процесс нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности рыхлящих лап культиватора стерневого тяжелого. Полученные результаты внедрены на предприятия: ООО «Навигатор-НМ», г. Пермь; СПК (колхоз) имени Калинина, Дебесского района, Удмуртской Республики; ООО Агрофирма «Труд», Пермский край, с. Троельга, а также используются в учебном процессе Пермской ГСХА.

**Степень достоверности результатов.** Экспериментальные данные по структуре и свойствам покрытий получены на поверенном оборудовании в сертифицированных лабораториях с использованием современных методов обработки информации и статического анализа.

**Вклад автора в проведенное исследование.** Определены состав порошковой проволоки и режимы дуговой металлизации износостойких покрытий. Исследована зависимость физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий от системы легиро-

вания порошковых проволок и режимов дуговой металлизации. Разработан технологический процесс упрочнения рыхлящих лап культиватора стерневого тяжелого.

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты работы были представлены и обсуждены на международных научно-практических конференциях: НПФ «Плазмацентр» (С.-Петербург, 2011); «Инновационные проекты в области агроинженерии», Московский ГАУ (Москва, 2011); «Инженерная мысль машиностроения будущего» УрФУ (Екатеринбург, 2013); «Сварка. Контроль и диагностика», МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО» (Екатеринбург, 2013); «Знания молодых: наука, практика и инновации», Вятская ГСХА (Киров, 2014); «Аграрная наука в инновационном развитии АПК», Башкирский ГАУ (Уфа, 2015–2016). На всероссийских научно-практических конференциях: LXXII – LXXVII, «Молодежная наука 2012–2017: технологии, инновации», Пермская ГСХА (Пермь, 2012–2017); «Участие молодых ученых в решении актуальных вопросов АПК России», Пензенская ГСХА (Пенза, 2016). По теме диссертации выполнены НИОКР в рамках конкурсов «У.М.Н.И.К.» (госконтракт № 422 ГУ1/2013 от 13.11.2013 г.; госконтракт № 5634 ГУ2/2014 от 13.05.2015 г.) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент РФ на изобретение. Общий объем публикаций составляет 3,89 п.л., из них автору принадлежит 1,32 п.л.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Материал изложен на 131 страницах, содержит 25 таблиц, 28 иллюстраций, 11 приложений. Список литературы состоит из 94 наименований, из них 4 на иностранных языках.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Оптимизированный состав порошковой проволоки и параметры режима дуговой металлизации износостойких покрытий.
2. Результаты исследования зависимости физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий из порошковых проволок от их состава.
3. Технология упрочнения рыхлящих лап культиватора стерневого тяжелого, и результаты эксплуатационных исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены цель и задачи исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «*Современное состояние исследуемого вопроса*» обоснована необходимость применения ДМ-покрытий для упрочнения рыхлящих лап культиватора стерневого тяжелого для повышения их износостойкости. Проанализировано современное состояние вопроса повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин (РОПМ) и предъявляемые к ним требования. Проведен анализ методов и материалов, повышающих износостойкость РОПМ.

На основании проведенного анализа и в соответствии с поставленной целью определены задачи исследований.

**Во второй главе** «*Теоретические предпосылки дуговой металлизации износостойких покрытий*» приводится представление о формировании свойств покрытий при дуго-

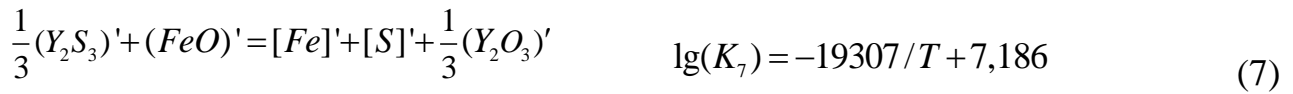
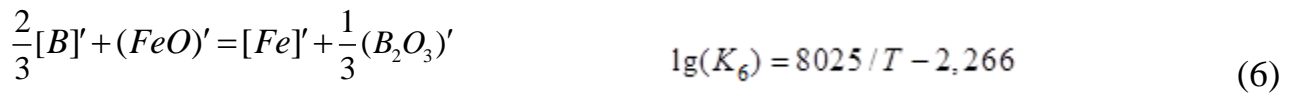
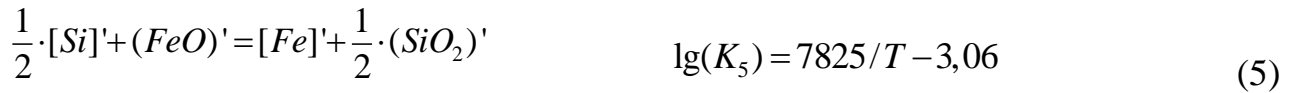
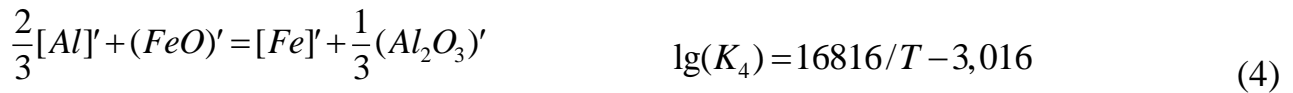
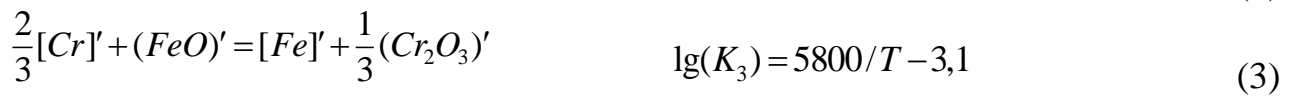
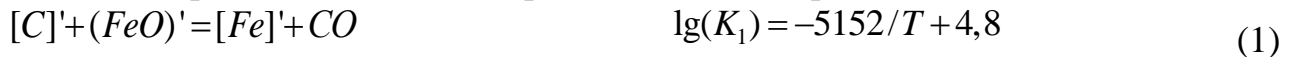
вой металлизации и перспективы совершенствования технологии дуговой металлизации (ДМ) с использованием модели окисления частиц при ДМ.

Для исследований были выбраны следующие напыляемые материалы: сплошная проволока (СП) марки 20Х13 системы легирования Fe-C-Cr, порошковая проволока (ПП) 20Х11Р5Ю3СИ системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y диаметром 2,0 мм. Рассматриваемый способ нанесения покрытий – активированная дуговая металлизация (АДМ). Транспортирующий газ продукты сгорания пропано-воздушной смеси. АДМ-аппарат также применяли для ДМ при использовании только воздуха в качестве транспортирующего газа.

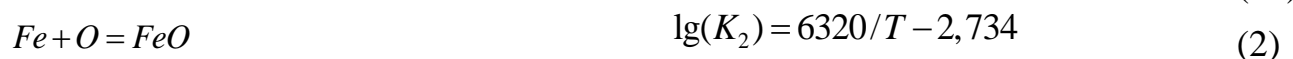
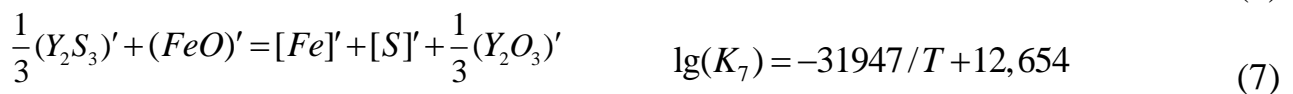
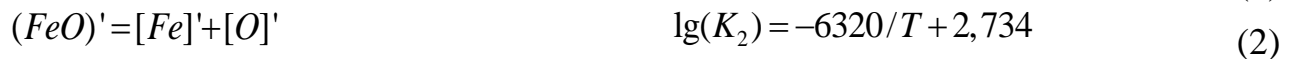
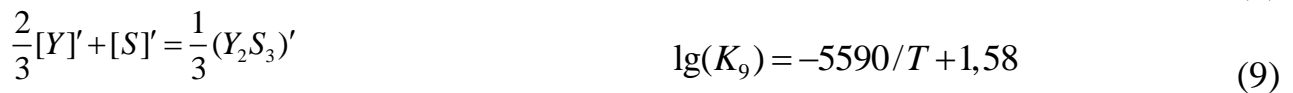
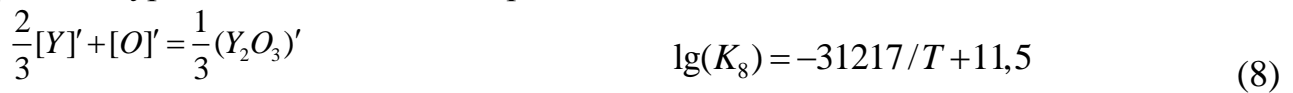
Граничные условия и допущения приняты по модели В.Н. Бороненкова и Ю.С. Коробова. Дополнительно меняются тепловые поля на торце электрода в случае использования ПП. Для ПП с учетом коэффициента заполнения 30% приняли среднемассовую температуру на торце ПП 2100 К, в зоне горения дуги – 2500 К.

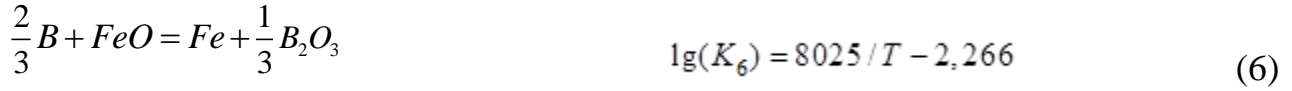
При моделировании поступления кислорода в распыляемый металл при ДМ дополнительно внесли следующие изменения. При описании процесса поступления кислорода в каплю наносимого покрытия и образования шлака плотность металла приняли равной  $6,2 \text{ г/см}^3 \sim (6\,200 \text{ кг/м}^3)$  при температурах 2000–2500 К, плотность шлака –  $5,5 \text{ г/см}^3 \sim (5\,500 \text{ кг/м}^3)$ .

Принято также, что взаимодействие металла и шлака на границе раздела описывается комплексом реакций окисления примесей с общим реагентом FeO:



Константы равновесия реакций (6) и (7) найдены расчетным путем по методу комбинирования уравнений химических реакций:





Из условия, что протекание каждой реакции сопровождается потреблением определенного количества FeO, суммарный диффузионный поток компонентов равен диффузионному потоку FeO:

$$I_{FeO} - I_C - I_O - \frac{3}{2}I_{Cr} - \frac{3}{2}I_{Al} - 2I_{Si} - 3I_S - \frac{3}{2}I_B = 0 \quad (11)$$

тогда для данных компонентов

$$\begin{aligned} & I_{FeO}^{\Pi} \left(1 - \frac{x}{(FeO)}\right) - I_C^{\Pi} \left(1 - \frac{1}{K_1[C]x}\right) - I_O^{\Pi} \left(\frac{K_2x}{[O]} - 1\right) - \\ & - \frac{3}{2} I_{[Cr]}^{\Pi} \left[1 + b_{Cr} \frac{I_{[Cr]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(Cr_2O_3)}^{\Pi}} - \sqrt{\left(1 + b_{Cr} \frac{I_{[Cr]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(Cr_2O_3)}^{\Pi}}\right)^2 - 1 + b_{Cr}}\right] - \\ & - \frac{3}{2} I_{[Al]}^{\Pi} \left[1 + b_{Al} \frac{I_{[Al]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(Al_2O_3)}^{\Pi}} - \sqrt{\left(1 + b_{Al} \frac{I_{[Al]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(Al_2O_3)}^{\Pi}}\right)^2 - 1 + b_{Al}}\right] - \\ & - 2 \frac{x^2 K_5^2 [Si] - (SiO_2)}{x^2 K_5^2 [Si] / I_{Si}^{\Pi} + (SiO_2) / I_{SiO_2}^{\Pi}} - \\ & - 3 I_{[S]}^{\Pi} \left[1 + b_S \frac{I_{[S]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(S)}^{\Pi}} - \sqrt{\left(1 + b_S \frac{I_{[S]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(S)}^{\Pi}}\right)^2 - 1 + b_S}\right] - \\ & - \frac{3}{2} I_{[B]}^{\Pi} \left[1 + b_B \frac{I_{[B]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(B_2O_3)}^{\Pi}} - \sqrt{\left(1 + b_B \frac{I_{[B]}^{\Pi}}{4 \cdot I_{(B_2O_3)}^{\Pi}}\right)^2 - 1 + b_B}\right] ; \end{aligned} \quad (12)$$

$$x = \frac{(FeO)'}{[Fe]'} = \frac{1}{K_i} \frac{(\partial_{in} O_m)^{1/m} \cdot (1 + I_{\partial_{in} O_m} / I_{\partial_{in} O_m}^{\Pi})^{1/m}}{[\partial_i]^{n/m} \cdot (1 - I_{\partial_i} / I_{\partial_i}^{\Pi})^{n/m}}$$

где

$$b_{Cr} = \frac{(Cr_2O_3)}{K_3^3 \cdot x^3 \cdot [Cr]^2}, \quad b_{Al} = \frac{(Al_2O_3)}{K_4^3 \cdot x^3 \cdot [Al]^2}, \quad b_S = \frac{(S)}{K_6^3 \cdot x^3 \cdot [S]^2}, \quad b_B = \frac{(B_2O_3)}{K_7^3 \cdot x^3 \cdot [B]^2}$$

При определении предельных диффузионных потоков компонентов на границе металл–шлак приняли  $\beta = 1,2$  – конвективная постоянная, одинаковая для всех реагентов,  $c^{1/2}$ ; коэффициенты диффузии компонентов в расплаве,  $m^2/c$ , приняты:  $[C] = 5,4 \cdot 10^5$ ,  $[O] = 12,2 \cdot 10^5$ ,  $[Cr] = 3,3 \cdot 10^5$ ,  $[Al] = 1,55 \cdot 10^5$ ,  $[Si] = 2,5 \cdot 10^5$ ,  $[B] = 1 \cdot 10^5$ ,  $[Y] = 1 \cdot 10^5$ . Состав шлага принят, мас. %:  $(FeO) = 5$ ;  $(Cr_2O_3) = 5$ ;  $(Al_2O_3) = 20$ ;  $(SiO_2) = 10$ ;  $(B_2O_3) = 10$ ;  $(Y_2O_3) = 50$ . Коэффициенты диффузии компонентов шлага  $(FeO) = 1 \cdot 10^{-5}$ ,  $(SiO_2) = 1 \cdot 10^{-6}$  для  $(Cr_2O_3) = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $(Al_2O_3) = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $(TiO_2) = 1 \cdot 10^{-6}$ ,  $(Y_2O_3) = 1 \cdot 10^{-6}$ .

После определения  $x$  и, соответственно, диффузионных потоков на границе металл–шлак (для FeO –  $I_{FeO}$ , для компонентов –  $I_{\partial_i}$ ) рассчитывали содержание оксидов и

элементов в капле после процессов на шаге во фронтальной части, при различных значениях доли поверхности, свободной от шлака,  $L=0,2-0,5$ .

Общее количество кислорода  $m_o$ , поступившего в каплю  $i$ -й фракции, определяли как сумму кислорода, растворенного в жидком металле и находящегося в шлаке:

$$m_o = m_{Me} \frac{[O]}{100} + m_{ш} \left( \frac{(FeO)M_o}{100M_{FeO}} + \frac{(Cr_2O_3)M_o}{100M_{Cr_2O_3}} + \frac{(Al_2O_3)M_o}{100M_{Al_2O_3}} + \frac{(SiO_2)M_o}{100M_{SiO_2}} + \frac{(B_2O_3)M_o}{100M_{TiO_2}} + \frac{(Y_2O_3)M_o}{100M_{Y_2O_3}} \right) \quad (13)$$

Степень окисления частиц в данной фракции  $r_i$  составит

$$r_i = (m_o \cdot 100)(m_{Me} + m_{ш})^{-1} \quad (14)$$

Общую степень окисления  $R$  суммировали согласно распределению капель по массовой доле:

$$R = \left( \sum (r_i \cdot dm_i) \right) \cdot 100 \quad (15)$$

Распределение частиц по фракциям и массовым долям принято согласно результатам гранулометрического анализа.

При распылении ПП на типовых режимах происходит выгорание легирующих элементов и насыщение распыляемого металла кислородом из атмосферы. Разноплановость и сложный характер взаимосвязи параметров, определяющих возможность получения качественных покрытий, делают целесообразным применение метода планирования эксперимента.

С помощью метода планирования эксперимента исследовали влияние технологических параметров АДМ на свойства металлизационных покрытий из ПП и их оптимизацию.

**В третьей главе «Программа, методика исследований и испытаний»** описаны программа, оборудование, материалы и методика лабораторных и эксплуатационных исследований.

Для оптимизации режимов дуговой металлизации использовали четырехфакторный эксперимент для линейной модели в виде полуреплики  $2^{4-1}$  по критериям ортогональности и ротатабельности. В качестве критерия оптимизации использовали характеристику прочности сцепления наносимого покрытия с основой. Факторы и интервалы их варьирования (Таблица 1) соответствуют типовым значениям для ДМ, условия проведения экспериментов приведены (Таблица 2). В качестве фиксированных параметров АДМ приняты давление воздуха и пропана, соответственно 0,42 и 0,40 МПа, скорость перемещения пистолета относительно напыляемой поверхности 0,1 м/с.

Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью инструмента Designofexperiments (DoE) программного пакета STATISTICA 6.1.

Таблица 1 – План эксперимента

Фактор	Наименование	Обозначение	Уровни		Интервал
			нижний	верхний	
$x_1$	Ток дуги, А	I	200	300	50
$x_2$	Напряжение дуги, В	U	34	42	4



Продолжение таблицы 1					
$x_3$	Толщина покрытия, мм	T	0,2	0,6	0,2
$x_4$	Дистанция, мм	S	100	150	25

Для исследования структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств металлизационных покрытий использовались сплошная проволока (СП) марки 20X13 системы легирования Fe-C-Cr, порошковые проволоки 60X13P5СИ системы легирования Fe-Cr-B-C-Y, 20X11P5C5И системы легирования Fe-Cr-B-Si-Y, 20X11P5Ю3СИ системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y диаметром 2,0 мм.

Таблица 2–Условия проведения опытов\*

№ эксперимента	Факторы эксперимента				Критерий оптимизации $\bar{y}$ , МПа
	$x_1$ , А	$x_2$ , В	$x_3$ , мм	$x_4$ , мм	
1	200	34	0,20	100	20,10
2	300	34	0,60	100	36,80
3	200	34	0,60	150	27,32
4	200	42	0,20	150	17,76
5	300	42	0,20	100	29,28
6	300	34	0,20	150	22,72
7	200	42	0,60	100	30,43
8	300	42	0,60	150	33,59

\* Приведены данные для АДМ-покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ

При напылении образцов покрытий применяли следующие материалы: сталь 20 (ГОСТ 1050), ацетон (ГОСТ 2768), дробь стальную колотую марки ДСК 2,0 (ГОСТ 11964), сжатый воздух 5 класса (ГОСТ 17433).

Кроме того, при исследовании структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств образцов покрытий применяли азотную кислоту (HNO<sub>3</sub>), ГОСТ 4461-77, этиловый технический спирт (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), ГОСТ 18300-87, дистиллированную воду (H<sub>2</sub>O), ГОСТ 6709, пасту ГОИ № 2, ТУ 6-18-36, алмазную пасту НОМ 60/40, ГОСТ 25593.

Подготовку поверхности образцов под напыление покрытий осуществляли в соответствии с ГОСТ 9.304. Образцы подвергали обезжириванию ацетоном, после чего продували сжатым воздухом. Работы по подготовке поверхности под напыление покрытия проводили при температуре воздуха не ниже +5°C, с целью исключения конденсации влаги на образцах.

Струйно-абразивную обработку (САО) поверхности образцов перед напылением покрытия производили пистолетом инжекционного типа с диаметром сопла 8 мм при рабочем давлении сжатого воздуха 0,5–0,6 МПа и его расходе 174–216 м<sup>3</sup>/ч. В качестве абразива применяли стальную колотую дробь при ее расходе 0,05–1,2 кг/с. Угол наклона струи абразива к поверхности образца – 90±10°. Расстояние от сопла до поверхности образца – 100–150 мм. Шероховатость поверхности после САО допускали не ниже Ra 12.5, контролировали с помощью набора образцов шероховатости поверхности сравнения (ОШС) по стали – дробеструйная обработка (ДС) по ГОСТ 9378, степень очистки 1 по ГОСТ 9.402.

Покрyтия наносили не позднее 2 часов после САО с помощью аппарата активированной дуговой металлизации АДМ-10 при оптимизированных по методу планирования эксперимента режимах: ток дуги – 320 А, напряжение – 34 В, дистанция напыления – 95 мм, толщина покрyтия – 0,7 мм, давление воздуха и пропана соответственно 0,42 и 0,41 МПа, скорость перемещения пистолета относительно напыляемой поверхности – 0,1 м/с. При напылении не допускали нагрев образцов свыше 200°С, что контролировали бесконтактным термометром RaytekST-80 RroPlus.

Для исследования структуры, фазового состава и выполнения микрохимического анализа использовали образцы покрyтий, напыленные на пластины 20×20×1,5 мм из стали 20. Из указанных образцов готовили поперечные металлографические шлифы с использованием пасты ГОИ № 2 и алмазной пасты НОМ 60/40 на полировальном станке Laborol. Для травления шлифов использовали трехпроцентный раствор азотной кислоты в спирте.

Фазовый состав покрyтий определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZUXRD-7000 в Cr- $k_{\alpha}$ -излучении. Структуру и микрохимический состав покрyтий изучали на сканирующем электронном микроскопе VEGAИХМУ с волнодисперсионным INCAWave 700 и энергодисперсионным INCAEnergy 450ХТ микроанализаторами.

Микротвердость с поверхности металлизационных покрyтий и по их сечению измеряли согласно ГОСТ 9450 на микротвердомере Leica VMHT AUTO при нагрузке 100 г, индентором служила алмазная пирамида с углом между противоположными гранями 136°.

Адгезионную прочность покрyтий из СП и ПП определяли по методике конического штифта с помощью машины Instron 3382.

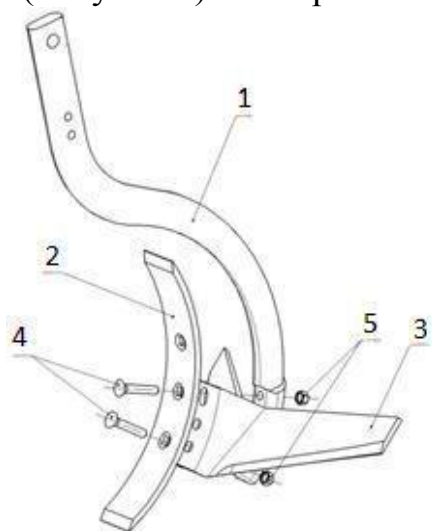
Пористость покрyтий определяли металлографическим методом на поперечных шлифах с помощью промышленного программно-аппаратного комплекса SIAMS 700 на базе управляющей программы SIAMSPhotolab с оценкой распределения пор покрyтия по размерам, площади и объему:  $n$  – численная доля пор,  $A$  – доля по площади,  $V$  – доля по объему. Объем поры вычисляли как  $V = \pi D^3 / 6$   $D = \sqrt{4A / \pi}$  – диаметр круга, эквивалентного поре по площади  $A$ , результаты определения пористости усредняли для пяти полей зрения в соответствии с ASTM E2109-01.

Износостойкость определяли при трении о закрепленные частицы абразива по методике Хрущева М.М. и Бабичева М.А. Испытывали образцы с размерами 10×10 мм путем совершения возвратно-поступательных движений по шлифовальной бумаге 14A32МН481 по ГОСТ 6456 на основе электрокорунда. Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с устанавливался равным 60 м. Нормальная удельная нагрузка на образец 10 кг, удельная нагрузка 1 МПа, величина поперечного смещения шлифовальной бумаги на один двойной ход образца – 0,0012 м. Показатель износостойкости покрyтий, равный отношению изменений массы эталона и образца, определялся по результатам трех испытаний.

В качестве деталей для проведения исследования износостойкости полученных покрyтий в реальных условиях эксплуатации были получены плоскорежущие лапы с лемехами крыловидной формы культиватора стерневого тяжелого (КСТ-3,8), производство «Bellota», Испания (рисунок 1).

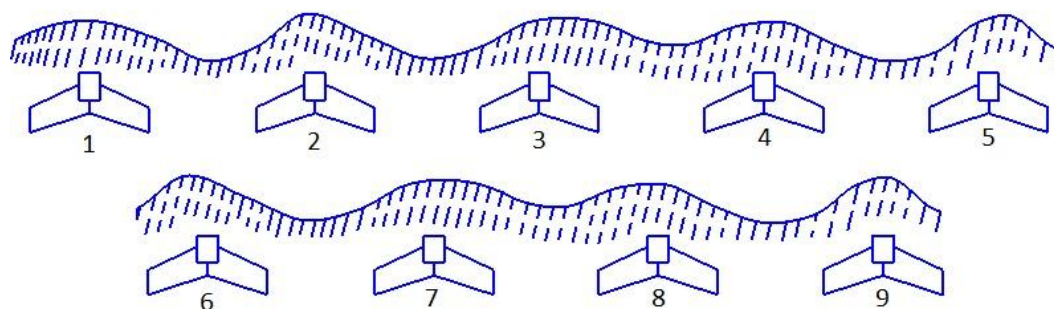
Показатели условий исследований определены по ГОСТ 54783-2011. Исследования проводили на полях СПК (колхоз) имени Калинина Дебесского района, Удмуртской Республики.

Перед исследованиями на их поверхность наносили металлизационные покрытия из порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y. Одновременно с упрочненными деталями использовали серийные лапы, изготовленные из стали 28MnB5 (аналог российской стали 35Г). Плоскорезающие лапы с лемехами устанавливали по схеме (Рисунок 2). Номер на схеме соответствует маркировке рабочего органа.



1 – стойка; 2 – долото; 3 – лемех крыловидный; 4 – винт М12х70; 5 – гайка М12  
Рисунок 1 – Рабочий орган культиватора КСТ-3,8

Параметром, определяющим текущее состояние рабочего органа, являлась потеря массы. Контроль износа проверяли с шагом 2 га до наработки 10 га, затем через 5 га до наработки 40 га, при этом рабочие органы снимали с машины и очищали от остатков почвы. Взвешивание выполняли на весах CASED-H-15 (высокий (II) класс точности) с погрешностью измерения массы 0,5 г. Износостойкость лап культиватора с нанесенными покрытиями определяли относительным методом, приняв за 1,0 износостойкость серийных. Органолептическим методом оценивали состояние покрытий: сколы, трещины, отслаивание, равномерность износа.



1, 3, 5, 7, 9 – упрочненные ПП 20X11P5Ю3СИ; 2, 4, 6, 8 – серийные лапы  
Рисунок 2 – Схема расстановки лап на культиватор КСТ-3,8:

**В четвертой главе «Анализ результатов исследований и испытаний»** представлены основные результаты экспериментальных исследований.

Оценку достоверности результатов моделирования производили измерением содержания кислорода в ДМ-покрытиях из ПП и СП методом восстановительного плавления в токе инертного газа с помощью анализатора ON-900. Погрешность расчета составляет не более 16%. Сравнение опытных и расчетных данных (Таблица 3) показало, что в случае АДМ исследуемой ПП расчетные значения совпадают с опытными данными для доли поверхности капли, свободной от шлака,  $L = 0,2-0,3$ .

Указанный эффект обусловлен введением в шихту ПП компонентов, увеличивающих вязкость шлака, таких как алюминий. Доля  $L$  постоянно меняется в зависимости от изменения скорости, температуры частиц по дистанции, их возможного вращения. Сравнение полученных результатов с данными для СП показывает, что  $L$  меняется также от химического состава распыляемого материала. В дальнейшем при расчетах приняли, что показатель  $L=0,25$  наиболее достоверно отражает происходящие физические процессы.

Таблица 3 – Сравнение расчетных и опытных данных по степени окисления покрытий для разной доли поверхности капли, свободной от шлака\*

Степень окисления $R$ , %	СП 20X13	ПП 60X13P5СИ	ПП 20X11P5C5И	ПП 20X11P5Ю3СИ
Расчетные данные $L = 0,2-0,3$	2,15 – 2,86	1,38–1,78	1,34–1,73	1,14–1,51
Расчетные данные $L = 0,4-0,5$	3,67 – 4,51	2,07–2,25	1,99–2,18	1,93–2,36
Опытные данные	2,40	1,54	1,49	1,27

\* Для СП ток дуги – 180 А, напряжение – 28 В, дистанция напыления – 100 мм, толщина покрытия – 0,6 мм; для ПП ток дуги – 300 А, напряжение – 34 В, дистанция напыления – 100 мм, толщина покрытия – 0,6 мм.

Установлено, что степень окисления АДМ-покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ в 1,89 раза ниже, чем у АДМ-покрытий из СП 20X13. Полученный результат, как нами предполагается, обусловлен большим сродством иттрия и алюминия к кислороду. Это способствует снижению степени окисления частиц распыляемого материала и улучшению условий взаимодействия в контакте «частица-подложка».

Адгезионная прочность АДМ-покрытий из ПП в 1,34 раза выше, чем у АДМ-покрытий из СП. Это связано с меньшей степенью окисления частиц, что приводит к улучшению условий теплообмена при контакте на границе частица–подложка.

Результаты регрессионного анализа экспериментальных данных по адгезионной прочности покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ, выполненного при помощи STATISTICA 6.1, приведены в Таблице 4. Линейное уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным по критерию Фишера для  $ss$ -числа степеней свободы и заданного  $p$ -уровня значимости. Все коэффициенты уравнения регрессии, кроме определяющего влияние напряжения дуги, статистически значимы по  $t$ -критерию Стьюдента.

Таблица 4 – Оценка адекватности линейной модели\*

Factor	SS	сс	MS	$F$	$p$
$I$	89,646	1	89,646	78,041	0,00305
$U$	2,121	1	2,121	1,847	0,26726
$T$	183,169	1	183,169	159,458	0,00107
$S$	28,956	1	28,956	25,207	0,01521
Error	3,446	3	1,148		
Total SS	307,339				

\*SS – сумма квадратов;  $сс$  – степени свободы; MS – среднее квадратичное;  $F$  – критерий Фишера;  $p$  – уровень значимости.

Зависимость адгезионной прочности покрытия от параметров ДМ по результатам регрессионного анализа (Таблица 5) может быть выражена по уравнению

$$y = 0,54x_1 + 0,77x_3 - 0,31x_4 \quad (16)$$

где  $x_1$  – ток дуги, А;  $x_3$  – толщина покрытия, мм;  $x_4$  – дистанция напыления, мм.

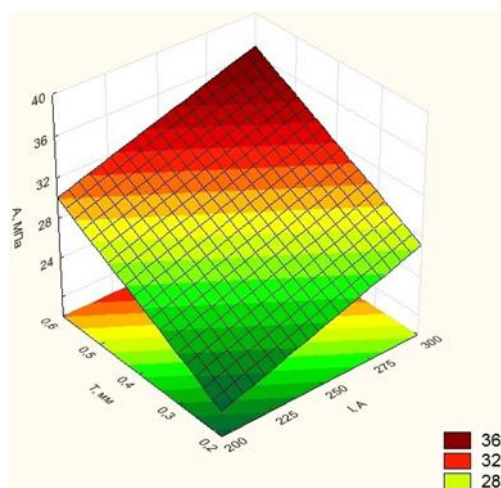
Таблица 5 – Оценка статистической значимости регрессионных коэффициентов\*

Factor	Beta	Std.Err. Beta	$t(3)$	$p$ -level
$I$ , А	0,540078	0,061136	8,83410	0,003057
$U$ , V	0,083089	0,061136	1,35909	0,267266

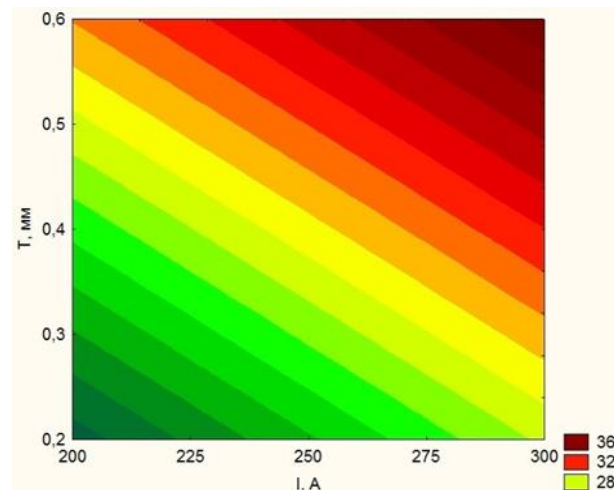
$T, \text{ mm}$	0,772000	0,061136	12,62768	0,001071
$S, \text{ mm}$	-0,306945	0,061136	-5,02072	0,015219

\* Beta – коэффициенты регрессии; Std.Err. – стандартные ошибки для коэффициентов регрессии;  $p$  – уровень значимости;  $t$  – критерий Стьюдента.

Интерпретация полученных результатов выполнена с помощью графиков поверхности и карт линий уровня отклика (Рисунок 3 и 4). Адгезия металлизационных покрытий возрастает с увеличением их толщины, тока дуги, а также с уменьшением дистанции напыления.

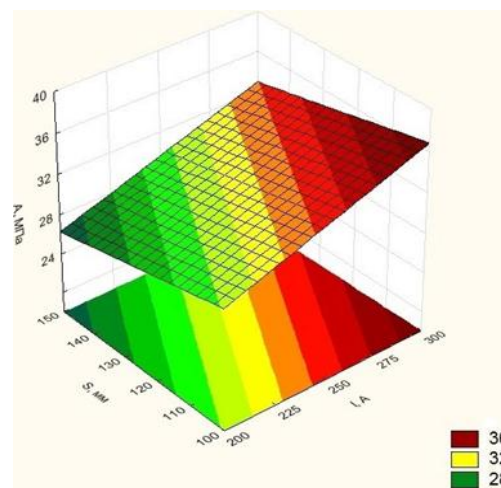


а

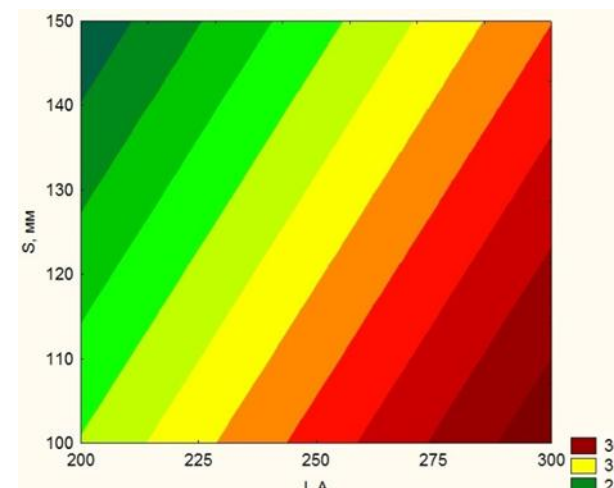


б

Рисунок 3 – График поверхности (а) и карта линии уровня отклика (б) для факторов тока дуги и толщины покрытия



а



б

Рисунок 4 – График поверхности (а) и карта линии уровня отклика (б) для факторов тока дуги и дистанции напыления

Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что адгезия металлизационных покрытий возрастает с увеличением их толщины, тока дуги, а также с уменьшением дистанции напыления (в порядке уменьшения эффекта от воздействия факторов). Влияние напряжения дуги статистически не значимо.

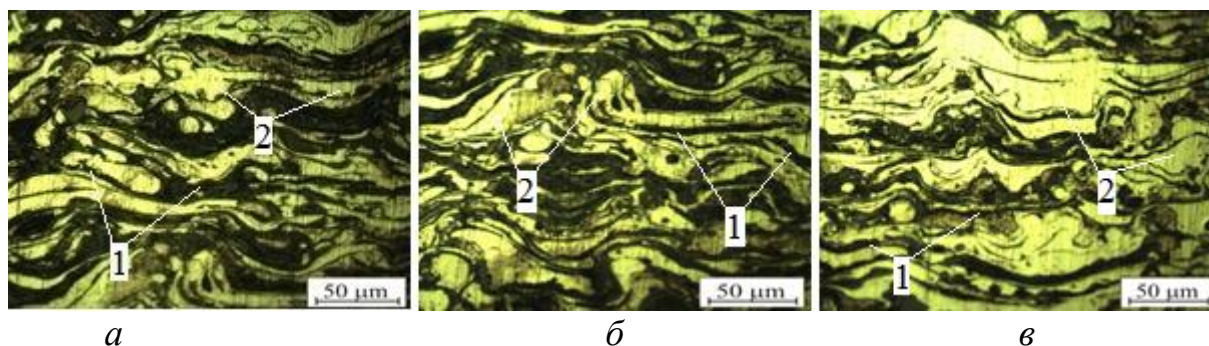
Для оптимизации технологических параметров ДМ по критерию максимальной адгезионной прочности напыляемых покрытий применяли метод крутого восхождения (Таблица 6).

Таблица 6 – Оптимизация режимов ДМ методом крутого восхождения

Характеристики		Факторы		
		$x_1, A$	$x_3, мм$	$x_4, мм$
Нулевой уровень, $x_{i0}$		300	0,6	100
Интервал варьирования, $\Delta x_i$		50	0,2	25
Коэффициенты, $b_i$		0,54	0,77	-0,30
Произведение, $b_i \Delta x_i$		27	0,15	7,50
Шаг $h_a$ при изменении базового фактора $x_1$ на 10		10	0,054	2,778
Округление шага варьирования		10	0,05	2,80
Крутое восхождение		Переменная состояния		
$x_1$	$x_3$	$x_4$	$\bar{y}$	
310	0,65	97,2	36,978	
320	0,70	94,4	42,768	
330	0,75	91,6	31,189	

В результате определены оптимальные параметры ДМ покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ:  $I = 320 \pm 15 A$ ,  $U = 320 \pm 15 B$ ,  $T = 0.7 \pm 0,05 мм$ ,  $S = 95 \pm 5 мм$ , при этом адгезионная прочность покрытия составила 42,77 МПа.

Полученные металлизационные покрытия (рисунок 5) обладают характерной для методов газотермического напыления ламеллярно-пористой структурой, где светлые участки – металлическая основа, формируемая из капель расплавленного металла, а темные – прослойки оксидов, образующиеся при окислении капель на дистанции напыления. Структура покрытий отличается микрогетерогенностью и неравномерным сплавлением отдельных напыленных частиц друг с другом, причем для покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ микрогетерогенность ниже. Вероятно, микрогетерогенность структуры покрытий обусловлена наличием в ПП тугоплавких борсодержащих компонентов.



1 – оксидные пленки; 2 – металл

Рисунок 5 – Структура на поперечных шлифах покрытий:  
а – 60X13P5СИ; б – 20X11P5C5И; в – 20X11P5Ю3СИ

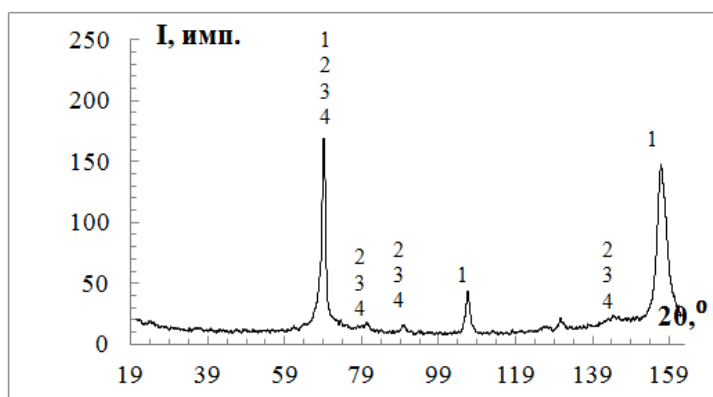
Результаты определения фазового состава методом рентгеноструктурного анализа приведены на Рисунке 6. Основной фазой покрытия является твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа. В покрытиях равномерно распределены упрочняющие фазы боридов  $Fe_2B$  и

карбоборидов  $(\text{Fe,Cr})_2(\text{B,C})$ .

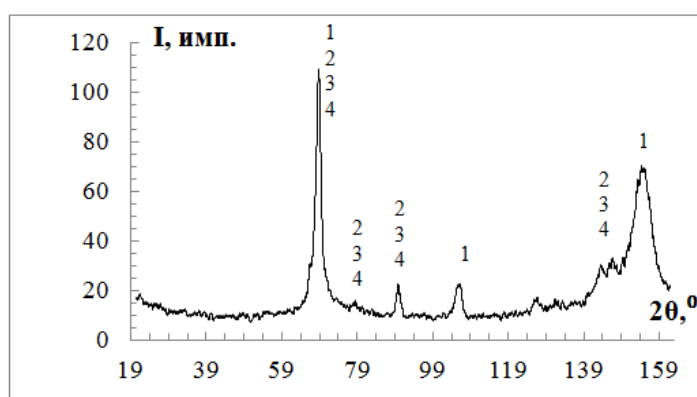
На Рисунке 7 показан микрохимический состав покрытия ПП 20X11P5Ю3СИ. На Рисунке 7а выделены участки А, В, С, которые рассмотрены на Рисунках 7б, в, г. Основу (стрелка 1 на Рисунках 7 б и г) составляет твердый раствор Fe-Cr-B (спектр 1 в Таблице 7). Структуры, обозначенные стрелкой 2, обогащены углеродом, замещающим часть железа и бора (спектр 2 в Таблице 7). Структура, обозначенная стрелкой 3 на Рисунке 7г, представляет собой обогащенную углеродом эвтектику с фазами  $(\text{Fe,Cr})\text{B}$  и  $\text{Fe}_2(\text{C,B})$  (спектр 3 в Таблице 7). Структура на Рисунке 7в имеет малое содержание кислорода, а также Fe, Al, Si, что свидетельствует о незначительном количестве оксидов в покрытии.

Таблица 7 – Микрорентгеноспектральный анализ покрытия из ПП 20X11P5Ю3СИ

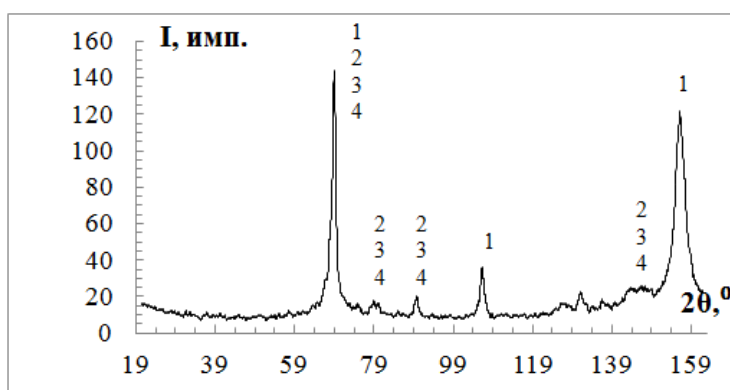
Спектр, ат.%	B	C	Al	Si	Cr	Fe	Y
Спектр 1	23,22	3,62	0,55	0,99	8,87	62,71	0,04
Спектр 2	20,57	16,81	0,48	1,01	8,98	52,11	0,03
Спектр 3	16,62	9,86	0,42	0,39	4,89	64,11	0,07



а



б



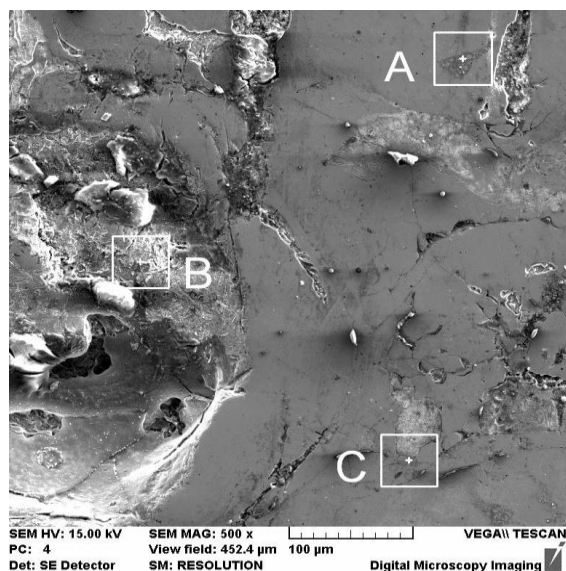
в

Цифры рядом с пиками соответствуют фазам:

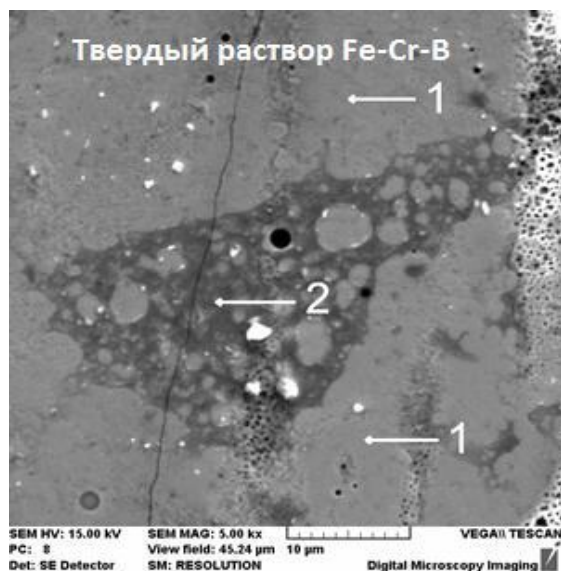
1 –  $\alpha\text{-Fe}$ ; 2 –  $\text{Fe}_2\text{B}$ ; 3 –  $(\text{Fe,Cr})_2(\text{B,C})$ ; 4 –  $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$

Рисунок 6– Дифрактограммы поверхности покрытий:

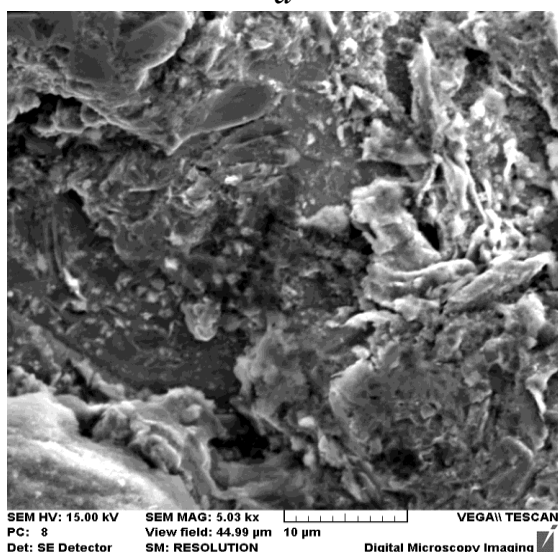
а – ПП 60X13P5СИ; б – ПП 20X11P5C5И; в – ПП 20X11P5Ю3СИ.



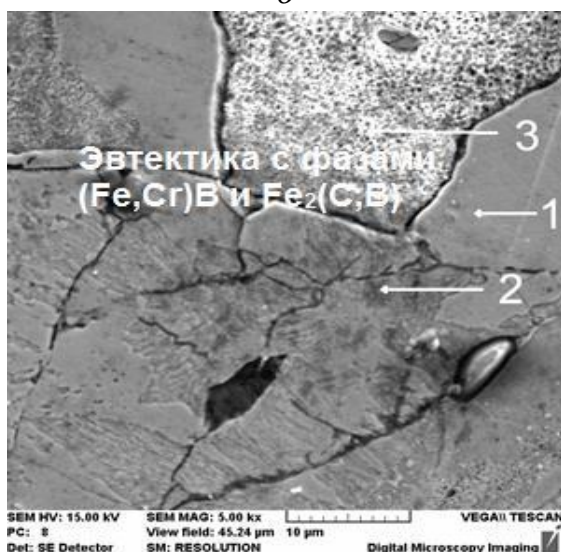
а



б



в



г

Рисунок 7– Микроструктура покрытия из ПП 20X11P5Ю3СИ:

б – участок А на рисунке а; в – участок В на рисунке а;

г – участок С на рисунке а

В Таблице 8 приведены результаты измерений микротвердости трех покрытий, выполненных на шлифах, изготовленных на поверхности напыленного слоя. Из приведенных данных следует, что наибольшим уровнем средней твердости характеризуется покрытие из ПП 20X11P5Ю3СИ, а наименьшим – покрытие из ПП 60X13P5СИ. Микротвердость всех покрытий отличается однородностью, что обусловлено равномерным распределением упрочняющих фаз в твердом растворе.

Таблица 8 – Микротвердость покрытий

Материал	Микротвердость HV0,3		
	среднее	максимальное	минимальное
ПП 60X13P5СИ	925±137	1117	636
ПП 20X11P5C5И	904±144	1229	603
ПП 20X11P5Ю3СИ	1111±64	1255	945

По результатам определения металлографическим методом пористости покрытия из ПП 60X13P5СИ, 20X11P5C5И, 20X11P5Ю3СИ имеют мелкопористую структуру, что



свидетельствует о стабильности процесса распыления ПП. Анализ данных указывает, что наименьшим уровнем пористости характеризуется покрытие из ПП 20X11P5Ю3СИ, а наибольшим – покрытие из ПП 60X13P5СИ.

При определении износостойкости по закрепленному абразиву наибольшую потерю массы имеют покрытия из ПП 60X13P5СИ, а наименьшую – покрытия из ПП 20X11P5Ю3СИ, при этом износостойкость покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ в 3,57 раза выше износостойкости покрытий из СП 20X13 (Рисунок 8).

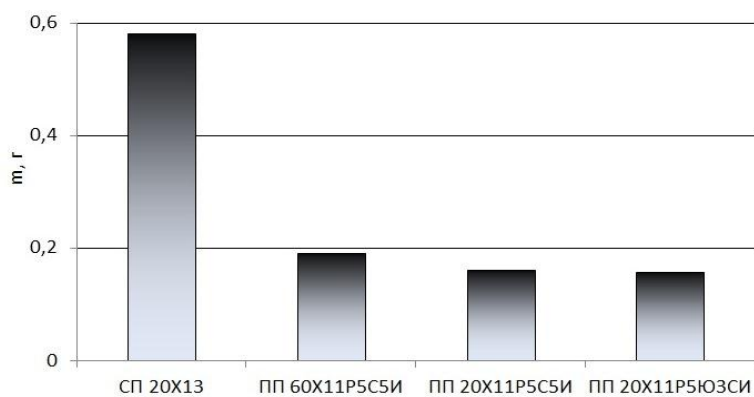


Рисунок 8 – Потеря массы покрытий по закрепленному абразиву

Эксплуатационные исследования позволили установить закономерности изнашивания рыхлящих лап в зависимости от наработки. Экспериментальные рыхлящие лапы были поставлены на культиватор КСТ-3,8, который агрегатировался трактором ХТЗ-150К. Исследования велись при обработке среднесуглинистых почв при глубине 8–12 см. Влажность почвы за период исследований варьировалась – 15–28%. Скорость движения агрегата составила

в среднем 7–9 км/ч. Наработка составила 40 га.

Эксплуатационные исследования рыхлящих лап культиватора стержневого тяжелого показали, что относительная потеря массы при достижении наработки 40 га упрочненных крыловидных лемехов составила 2,03–2,66 раза; для долота – 1,96–2,37 раза по сравнению с серийными (наработка 25 га) ресурс увеличен в 1,6 раза.

Эксплуатационные исследования упрочненных рыхлящих лап культиватора стержневого тяжелого с металлизационным покрытием из ПП 20X11P5Ю3СИ системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y подтвердили положительные результаты лабораторных исследований.

**В пятой главе «Технологии изготовления порошковых проволок и нанесения износостойких покрытий. Оценка экономической эффективности разработанных технологических решений»** приведены расчет шихты ПП и технология изготовления ПП, на основании теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический процесс упрочнения рыхлящих лап культиватора стержневого тяжелого с использованием активированной дуговой металлизации износостойких покрытий из ПП 20X11P5Ю3СИ системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y. Рассчитана себестоимость упрочнения одного рабочего органа и оценка экономической эффективности от внедрения его на предприятия сельского хозяйства.

Внутренний диаметр мотка ПП – не менее 250, внешний – не более 380 мм. Мотки состоят из одного отрезка проволоки массой от 5 до 25 кг. Каждый моток проволоки перевязаны мягкой отожженной проволокой не менее чем в трёх местах, равномерно расположенных по окружности мотка. На каждом мотке проволоки имеется маркировочный ярлык, на котором указаны: товарный знак и наименование предприятия изготовителя; условное обозначение проволоки; номер партии; номер замеса шихты; табельный номер волочильщика; коэффициент заполнения; дату изготовления (число, месяц, год); массу мотка (кг); штамп отдела технического контроля.

Технологический процесс упрочнения включает следующие операции: приемка, мойка, дефектация, подготовка напыляемого материала, подготовка оборудования для напыления, подготовка напыляемой поверхности, процесс напыления, контроль качества упрочненного слоя, сдача готовой продукции.

Предложенная технология внедрена на предприятия: ООО «Навигатор-НМ», г. Пермь; СПК (Колхоз) имени Калинина, Удмуртская Республика, д. Заречная Медля; ООО Агрофирма «Труд», Пермский край, с. Троельга,

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии на машиностроительные предприятия составит 1,012 млн руб./год при программе упрочнения 2000 шт. лап культиватора стерневого тяжелого. Для сельскохозяйственных предприятий: СПК (колхоз) имени Калинина составила 18 225 руб. при программе упрочнения 36 шт./год; ООО Агрофирма «Труд» составила 27 337,5 руб. при программе упрочнения 54 шт./год.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Степень окисления металлизационных покрытий с использованием порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ в 1,89 раза ниже, а адгезионная прочность в 1,34 раза выше, чем у металлизационных покрытий из сплошной проволоки 20X13. Методом планирования эксперимента определены технологические параметры дуговой металлизации порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ по критерию максимальной адгезионной прочности покрытий: *сила тока –  $320 \pm 15$  А; напряжение –  $34 \pm 1,5$  В; толщина покрытия –  $0,7 \pm 0,05$  мм; дистанция напыления –  $95 \pm 5$  мм, прочность покрытия составила 42,77 МПа.*

2. Лабораторными исследованиями установлена зависимость физико-механических и эксплуатационных свойств металлизационных покрытий из порошковых проволок от их системы легирования. Микротвердость покрытий из порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ в среднем в 1,21 раза выше, пористость в 1,40 раза ниже, а износостойкость в 1,15 раза выше, чем для покрытий из порошковой проволоки 60X13P5СИ. Металлографические исследования показали, что структура металлизационных покрытий из порошковых проволок 60X13P5СИ, 20X11P5C5И, 20X11P5Ю3СИ отличается микрогетерогенностью при неравномерном сплавлении отдельных напыленных частиц друг с другом. Основной фазой покрытия из порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ является твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа, в котором равномерно распределены упрочняющие фазы боридов  $Fe_2B$  и карбоборидов  $(Fe,Cr)_2(B,C)$ , на границах и внутри структурных составляющих обнаружены в малом количестве смешанные оксиды.

3. Эксплуатационные исследования рыхлящих лап с покрытием из порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ показали, что относительная износостойкость упрочненных крыловидных лемехов составила 2,03–2,66 раза, для двухстороннего долота – 1,96–2,37 раза по отношению к серийным, что обусловлено высокими показателями физико-механических и эксплуатационных свойств металлизационных покрытий. Разработан технологический процесс дуговой металлизации износостойких покрытий из порошковой проволоки 20X11P5Ю3СИ, позволяющий повысить износостойкость рабочих поверхностей рыхлящих лап культиватора и их ресурс в 1,6 раза. Определена экономическая эффективность от внедрения технологического процесса на машиностроительные

предприятия, составившая 1,012 млн руб./год, при программе упрочнения 2000 шт. что позволяет окупить инвестиционные затраты на реализацию проекта в размере 3,8 млн. руб. за 3,7 года. Экономическая эффективность для сельскохозяйственных предприятий: СПК (колхоз) имени Калинина составила 18 225 руб. при программе упрочнения 36 шт./год; ООО Агрофирма «Труд» составила 27 337,5 руб. при программе упрочнения 54 шт./год.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Перспективы дальнейшей разработки темы заключается в возможности получения покрытий с повышенной износостойкостью при воздействии высококонцентрированных источников тепла, в результате фрикционной или химикотермической обработки, что позволит обеспечить их эффективное использование для упрочнения тяжело нагруженных рабочих органов почвообрабатывающих машин

### Основные публикации по теме диссертации

#### *Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК*

1. Коробов, Ю.С. Использование порошковой проволоки для активированной дуговой металлизации [Текст] / Ю.С. Коробов, Ю.В. Щербаков, **А.М. Кашфуллин** // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2012. № 5 (56). С. 43-45 (0,31 п.л./0,10 п.л.).

2. Исследование влияния технологических параметров дуговой металлизации на адгезионную прочность покрытий [Текст] / Ю.С. Коробов, С.В. Невежин, В.С. Верхорубов, Г.А. Риммер, **А.М. Кашфуллин** // Сварка и диагностика. 2015. №1. С. 24-27 (0,25 п.л./0,05 п.л.).

3. Стойкость наплавленных слоев и напыленных покрытий со структурой метастабильного аустенита против абразивного и адгезионного изнашивания [Текст] / Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, **А.М. Кашфуллин** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, №2. С. 224-230 (0,43 п.л./0,07 п.л.).

#### *Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций:*

4. Щербаков, Ю.В. Активированная дуговая металлизация как метод восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственных машин [Текст] / Ю.В. Щербаков, **А.М. Кашфуллин** // Инновации аграрной науки – предприятиям АПК: сборник материалов: в 3 ч. / Пермская ГСХА. Межд. науч.-практ. конф. (Пермь, 24-25 апреля 2012 года); ред. Ю.Н. Зубарев [и др.]. – Пермь: Изд-во Пермская ГСХА, 2012. Ч. II. С. 141-145 (0,31 п.л./0,15 п.л.).

5. Щербаков, Ю.В. Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин на примере лап культиватора [Текст] / Ю. В.Щербаков, **А.М. Кашфуллин** // Молодежная наука 2013: технологии инновации: сборник материалов: в 3 ч. / Пермская ГСХА. Всерос.. науч.-практ. конф. (Пермь, 11-15 марта 2013 года); ред. Ю.Н. Зубарев [и др.]. Щербаков, Ю.В. Пермь: Изд-во Пермская ГСХА, 2013. Ч. III. С. 323-327 (0,31 п.л./0,15 п.л.).

6. **Кашфуллин, А.М.** Износостойкие покрытия со структурой метастабильного аустенита для деталей сельскохозяйственных машин [Текст] / Ю.С. Коробов [и др.] // Сборник материалов Второй Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего (ИММБ 2013). – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. С. 159-166 (0,43 п.л./0,08 п.л.).

7. **Кашфуллин, А.М.** Повышение ресурса деталей сельскохозяйственных машин нанесением покрытий со структурой метастабильного аустенита [Электронный ресурс] / Ю.С. Коробов [и др.] // Сборник докладов научно-практической конференции в рамках 13 Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (26-28 ноября 2013 г., Екатеринбург: МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО») / УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

Уральский институт сварки. Электрон. текстовые дан. Екатеринбург, 2013. 1 электрон. USB-диск. С. 81-86 (0,31 п.л./0,06 п.л.).

8. **Кашфуллин, А.М.** Износостойкость покрытий и наплавленного металла с метастабильным аустенитом [Электронный ресурс] / Ю.Б. Коробов [и др.] // Сборник докладов научно-практической конференции в рамках 13 Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» / УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Уральский институт сварки. Электрон. текстовые дан. Екатеринбург, 2013. 1 электрон. USB-диск. С. 87-92 (0,31 п.л./0,06 п.л.).

9. **Кашфуллин, А.М.** Исследование микротвердости покрытий, полученных активированной дуговой металлизацией [Текст] / А. М. Кашфуллин, А.А. Ильяев, А.Ф. Шаймиев // Молодежная наука 2014: технологии инновации: сборник материалов: в 4 ч. / Пермская ГСХА. Всерос. науч.-практ. конф.; ред. Ю.Н. Зубарев [и др.]. Пермь: Изд-во Пермской ГСХА, 2014. Ч. IV. С. 45-47 (0,18 п.л./0,06 п.л.).

10. Щербаков, Ю.В. Повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин активированной дуговой металлизацией [Текст] / Ю.В. Щербаков, **А.М. Кашфуллин** // Молодежная наука 2014: технологии инновации: сборник материалов: в 4 ч. / Пермская ГСХА. Всерос. науч.-практ. конф.; ред. Ю.Н. Зубарев [и др.]. Пермь: Изд-во Пермской ГСХА, 2014. Ч. IV. С. 47-49 (0,31 п.л./0,15 п.л.).

11. **Кашфуллин, А.М.** Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин активированной дуговой металлизацией износостойких покрытий из порошковых проволок системы легирования Fe-B-Cr [Текст] / Ю.В. Щербаков [и др.] // Аграрная наука в инновационном развитии АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. в рамках XXV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2015». Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. Ч. II. С. 277-284 (0,43 п.л./0,08 п.л.).

12. **Кашфуллин, А.М.** Совершенствование технологии дуговой металлизации износостойких покрытий [Текст] // Участие молодых ученых в решении актуальных вопросов АПК России: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции / Пензенская ГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2016. – С. 12-16. (0,31 п.л./0,31 п.л.).

### *Патенты на изобретения*

13. Порошковая проволока для нанесения покрытий, стойких к абразивному износу и высокотемпературной коррозии: пат. 2613118 Рос. Федерация МПК С22С 38/32, С23С 4/08, С23С 4/16, С23С 24/08 / Коробов Ю.С., **Кашфуллин А.М.** [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. - № 2015449083; заявл. 20.05.2015; опубл. 15.13.2017, Бюл. № 8.