На правах рукописи

**ВИНОГРАДОВ ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ**

# ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ОРУДИЙ КАРБОВИБРОДУГОВЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ИХ РЕЖУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина» (ФГБОУ ВО Орловский ГАУ).

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент **Титов Николай Владимирович**

Официальные оппоненты: **Михальченков Александр Михайлович,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», профессор кафедры технологии материалов, надежности, ремонта машин и оборудования

**Аулов Вячеслав Федорович**, кандидат технических наук, ФГБНУ «Федеральный научный агроиженерный центр ВИМ», заведующий лабораторией термодиффузионных композитных покрытий высоконагруженных деталей сельскохозяйственных машин

Ведущая организация — ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Защита состоится 11 мая 2017 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: http://ds.vsau.ru/?p=4439.

Автореферат разослан 10 марта 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Афоничев Дмитрий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в сельском хозяйстве для обработки почвы используется большое количество почвообрабатывающих орудий (культиваторы, посевные комплексы, сеялки, рыхлители и др.), широко применяемыми рабочими органами которых являются стрельчатые лапы. При эксплуатации почвообрабатывающих орудий стрельчатые лапы вследствие прямого воздействия абразивных частиц интенсивно изнашиваются, что приводит к значительному снижению качества выполняемых полевых работ. В связи с этим снижение изнашивания и, как следствие, повышение износостойкости и ресурса стрельчатых лап является одной из важных и актуальных научных проблем для предприятий, изготавливающих и эксплуатирующих сельскохозяйственную технику.

Одним из путей повышения износостойкости стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий является применение упрочняющих технологий. В настоящее время наиболее перспективными для повышения износостойкости деталей машин различного назначения являются металлокерамические материалы, которые наносятся на рабочие поверхности в виде покрытий. В то же время большинство известных технологий нанесения покрытий из данных материалов недостаточно эффективны для упрочнения стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий. Таким образом, разработка ресурсосберегающей технологии упрочнения стрельчатых лап за счет нанесения на их режущие поверхности металлокерамического покрытия будет способствовать решению актуальной народнохозяйственной проблемы повышения износостойкости рабочих органов отечественных и зарубежных почвообрабатывающих орудий.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина» по теме «Разработка и совершенствование технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей при производстве и ремонте сельскохозяйственной техники» (код 68.85.83).

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в развитие и совершенствование способов повышения износостойкости стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий внесли Аулов В.Ф., Ахметшин Т.Ф., Бернштейн Д.Б., Бетеня Г.Ф., Винокуров В.Н., Ерохин М.Н., Иванайский В.В., Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Лебедев А.Т., Литовченко Н.Н., Лялякин В.П., Михальченков А.М., Новиков В.С., Орлов Б.Н., Рабинович А.Ш., Севернев М.М., Сидоров С.А., Ткачев В.Н., Фаюршин А.Ф., Черноиванов В.И. и многие другие ученые. Однако сложность и значительная стоимость применяемого оборудования, а также высокая себестоимость расходных материалов существенно ограничивают применение данных способов для упрочнения стрельчатых лап.

В настоящее время перспективным способом, позволяющим значительно повысить износостойкость режущих поверхностей стрельчатых лап, является их карбовибродуговое упрочнение (КВДУ) с использованием металлокерамических паст. При КВДУ на упрочняемую поверхность наносится паста, содержащая ме-

таллическую матрицу, керамические компоненты, а также криолит. После высыхания паста расплавляется с использованием вибрирующего угольного электрода установки для КВДУ. При горении электрической дуги на упрочняемой режущей поверхности из компонентов пасты образуется металлокерамическое покрытие. Одновременно происходит термодиффузионное насыщение металла стрельчатой лапы углеродом за счет его диффузии вследствие сублимации угольного электрода.

В настоящее время способ КВДУ находится в состоянии развития. Пока еще остаются не до конца изученными вопросы, связанные с выбором рациональных режимов упрочнения и составов используемых металлокерамических паст. Практически не проводились комплексные исследования по использованию в качестве керамических компонентов паст карбидов (прежде всего, карбида бора). Его использование должно позволить значительно увеличить износостойкость упрочненных стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий в эксплуатации.

**Целью работы** является повышение износостойкости стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий металлокерамическими покрытиями, получаемыми на режущих поверхностях лап при карбовибродуговом упрочнении.

**Задачи исследования:**

- установить аналитические зависимости формирования напряженности электрического поля при КВДУ с целью обоснования толщины слоя металлокерамической пасты, обеспечивающей стабильное зажигание электрической дуги;
- провести экспериментальные исследования по определению толщины и физико-механических свойств металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ на пастах различного состава;
- провести сравнительные испытания на изнашивание, а также эксплуатационные испытания неупрочненных серийных и упрочненных КВДУ стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий;
- разработать технологический процесс КВДУ режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий и определить экономическую эффективность от его внедрения в производство.

**Объектом исследования** являются стрельчатые лапы почвообрабатывающих орудий (на примере стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н) и технология КВДУ стрельчатых лап.

**Предметом исследования** являются физико-механические и эксплуатационные свойства металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ на режущих поверхностях стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий.

**Научную новизну** работы составляют:

- аналитические зависимости, позволяющие определить толщину слоя металлокерамической пасты, обеспечивающую стабильное зажигание электрической дуги при КВДУ, отличающиеся учетом сопротивления затвердевшего слоя пасты, пороговых значений напряженности электрического поля, амплитуды и частоты вибрации угольного электрода;
- закономерности изменения толщины и физико-механических свойств металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ, отличающиеся использо-

ванием в качестве керамических компонентов металлокерамических паст оксидов алюминия и кремния, а также карбида бора;

- состав металлокерамической пасты и режимы КВДУ, обеспечивающие повышение износостойкости режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий в 2,4 раза в сравнении с неупрочненными серийными лапами;

- технология КВДУ режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий, отличающаяся возможностью упрочнять стрельчатые лапы широкой номенклатуры практически без ограничения по их массе и конфигурации и реализуемая как в стационарных условиях на специализированных предприятиях, так и в небольших ремонтных мастерских (патенты РФ на изобретения № 2532602, № 2535123, № 2540316).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты теоретических исследований позволяют установить аналитические зависимости формирования напряженности электрического поля при КВДУ с учетом известных закономерностей и принятых особенностей, а также определить рациональную толщину слоя металлокерамической пасты, обеспечивающую устойчивое зажигание электрической дуги. Практическая значимость работы заключается в определении рационального состава металлокерамической пасты и режимов КВДУ, а также разработке технологического процесса упрочнения стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий, которые позволяют в 2,4 раза повысить износостойкость режущих поверхностей стрельчатых лап по сравнению с неупрочненным серийными. Применение предлагаемой технологии позволяет снизить затраты на эксплуатацию сельскохозяйственной техники, а также решить проблемы ресурсосбережения и импортозамещения.

**Методология и методы исследования.** Теоретическая часть исследования выполнена с использованием методов и методик, применяемых в электродинамике, физике, математике. Экспериментальные исследования и их обработка проведены с использованием известных, отработанных методов, современных приборов и оборудования, а также основных положений теории вероятности и математической статистики.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- аналитические зависимости формирования напряженности электрического поля при КВДУ, позволяющие определить толщину слоя металлокерамической пасты, обеспечивающую устойчивое зажигание электрической дуги и получение на упрочняемых поверхностях качественного металлокерамического покрытия;

- результаты экспериментальных исследований, позволяющие установить влияние состава металлокерамических паст и режимов КВДУ на толщину и физико-механические свойства металлокерамических покрытий;

- результаты полевых эксплуатационных испытаний, позволяющие оценить интенсивность изнашивания неупрочненных серийных и упрочненных КВДУ стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий в условиях реальной эксплуатации;

- разработанная технология КВДУ стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий, позволяющая получать на упрочняемых режущих поверхностях стрельчатых лап металлокерамические покрытия.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследования, разработке программы и методик проведения экспериментальных исследований, разработке аналитических выражений, определяющих стабильное зажигание дуги при КВДУ, проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации опытных данных, формулировке выводов и рекомендаций.

**Реализация результатов исследования.** Разработанная технология КВДУ режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий (на примере стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н) внедрена в СПК «Сеньково» Глазуновского района Орловской области, а также рекомендована Департаментом сельского хозяйства Орловской области к внедрению на предприятиях АПК региона.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** Достоверность работы подтверждена высокой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на заседаниях кафедры надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, на Международных научно-практических конференциях: «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте-2012» г. Одесса 2012 г., «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства» г. Орел 2013 г., «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» г. Мичуринск 2015 г., «Актуальные проблемы XXI века» г. Москва 2015 г., «Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы» г. Ставрополь 2016 г., «Молодежь и XXI век – 2016» г. Курск 2016 г. По итогам проведения выставки-презентации инновационных разработок молодых ученых центрального федерального округа (г. Курск, 2015 г.) получена золотая медаль победителя. Получена серебряная медаль победителя в рамках Российской агропромышленной выставки «Золотая осень» 2016 года, г. Москва, ВДНХ. По итогам конкурсов среди студентов, аспирантов и молодых ученых на лучшую научно-исследовательскую работу (Воронеж, Воронежский ГАУ, 2015 г; Ставрополь, Ставропольский ГАУ, 2015 г.) получены дипломы победителя II степени.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 19 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и 2 статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, получено 3 патента на изобретения.

Общий объем публикаций составил 7,05 п.л., из них авторский вклад 4,76 п.л. (67,5%).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает введение, пять глав, заключения и список используемой литературы, включающий 167 источников, в том числе 12 на иностранном языке и 8 приложений. Работа содержит 156 страниц, 40 рисунков, 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 включает: актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

**В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования»** проанализированы условия работы и причины потери работоспособности стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий, проведен анализ износов стрельчатых лап (на примере лап культиватора КШУ-12Н). Проведен анализ современных способов упрочнения стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий, выявлены их преимущества и недостатки. Рассмотрены особенности КВДУ как перспективного способа упрочнения. Проведен анализ металлокерамических материалов, которые могут использоваться в составе паст для КВДУ. Сформулирована цель работы и определены задачи исследования.

**Во второй главе «Теоретическое обоснование процесса зажигания электрической дуги при КВДУ»** приводятся теоретические исследования по формированию напряженности электрического поля при КВДУ и определению рациональной толщины слоя металлокерамической пасты, обеспечивающей стабильное зажигание электрической дуги при КВДУ.

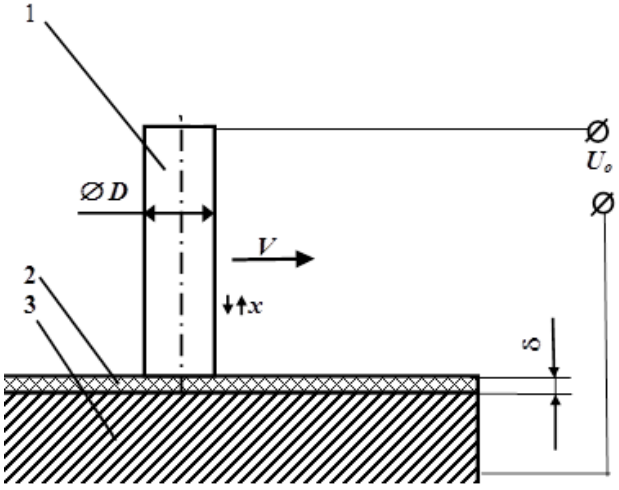



Рисунок 1 – Схема КВДУ: 1 – угольный электрод; 2 – слой затвердевшей металлокерамической пасты толщиной $\delta$; 3 – упрочняемая поверхность

Для успешной реализации технологии КВДУ необходимо обеспечить стабильность процесса зажигания дуги между колеблющимся угольным электродом и упрочняемой поверхностью с нанесенным слоем пасты (рисунок 1). Это может быть достигнуто при создании между ними напряженности $E$ электрического поля, превышающей определенное пороговое значение для зажигания дуги.

Для решения данной задачи может быть использован предложенный Л.А. Сена методический подход, в котором электрод и упрочняемая поверхность рассматриваются как обкладки конденсатора, между которыми размещен слой с определенным сопротивлением (рисунок 1). Напряженность поля $E$ между обкладками подобного конденсатора при традиционной вибродуговой наплавке может быть определена из зависимости:

$$E = k_E \cdot \frac{U_0}{\sqrt[3]{a \cdot R^2 S^2}}, \quad (1)$$

где $E$ – напряженность поля, В/мм;

$k_E$ – коэффициент, учитывающий влияние на напряженность электрического поля колебаний электрода в направлении наплавляемой поверхности, мм$^{5/3}$Ом$^{2/3}$/с$^{2/3}$;

$U_0$ – напряжение источника электропитания, $B$;

$R$ – сопротивление зоны контакта, расположенной между электродом и наплавляемой поверхностью, Ом;

$S$ – площадь микронеровностей в зоне контакта электрода и наплавляемой поверхности, мм$^2$;

$a$ – ускорение электрода при вибродуговой наплавке, мм/с$^2$.

Однако при КВДУ затвердевший слой пасты имеет значительно большее, чем в традиционной вибродуговой наплавке, электрическое сопротивление, и площадь контактирующей с электродом поверхности, сопоставимую с торцевой площадью электрода. В связи с этим в эмпирическую зависимость (1) введены потери напряжения на катоде $U_к$ и аноде $U_a$ и учтено размещение между угольным электродом и упрочняемой поверхностью затвердевшего слоя пасты с относительно большим сопротивлением. С учетом вышеизложенного зависимость (1) приведена к виду:

$$E = \frac{U_0 - (U_к + U_a)}{\delta(1 + k_a \sqrt[3]{a \cdot R^2 S^2})}, \quad (2)$$

где $k_a$ – коэффициент, учитывающий влияние колебаний электрода, ориентированных в направлении упрочняемой поверхности, на напряженность электрического поля, с$^{2/3}$мм$^{-5/3}$Ом$^{2/3}$;

$\delta$ – толщина затвердевшего слоя пасты, мм.

Тогда условие устойчивого зажигания электрической дуги при колебаниях электрода может быть записано в следующем виде:

$$E = \frac{U_0 - (U_к + U_a)}{\delta(1 + k_a \sqrt[3]{a \cdot R^2 S^2})} \geq E_3, \quad (3)$$

где $E_3$ – минимальное значение напряженности электрического поля, обеспечивающее зажигание дуги при КВДУ, В/мм.

Рассмотрим более подробно входящие в зависимость (3) параметры $a$, $R$ и $S$, оказывающие наиболее существенное влияние на напряженность $E$ электрического поля при КВДУ.

При упрочнении угольный электрод установки ВДГУ-2, используемой для КВДУ, колеблется с амплитудой А = 0,5…1,1 мм и частотой $f$ = 25 Гц и $f$ = 50 Гц, т.е. его перемещения при колебаниях в вертикальном направлении могут быть описаны уравнением:

$$x = A\sin(2\pi \cdot f \cdot t), \tag{4}$$

где $t$ – время, с.

Таким образом, амплитуда $a$ ускорения электрода при КВДУ может изменяться в достаточно широком диапазоне:

$$a = \ddot{x}_{\max} = 4A\pi^2 f^2 = 12300 \ldots . 49300 \quad \text{мм/с}^2. \tag{5}$$

Предварительно проведенными исследованиями было установлено, что наиболее существенное влияние на сопротивление $R$ затвердевшей пасты оказывает толщина слоя пасты, причем это влияние носит степенной характер, в аналитической форме имеющее вид:

$$R = k_\delta \delta^5, \tag{6}$$

где $k_\delta = 28500$ Ом/мм$^5$.

Величина площади микронеровностей $S$ в зоне контакта угольного электрода и упрочняемой поверхности может быть принята равной:

$$S = 0{,}25\pi D^2, \tag{7}$$

где $D$ – диаметр угольного электрода, мм.

Тогда с учетом приведенных выше результатов математическая зависимость (3) напряженности электрического поля, определяющая условие зажигания дуги, может быть записана в следующем виде:

$$E = \frac{U_0 - (U_к + U_a)}{\delta(1 + 2{,}9 \cdot k_a \sqrt[3]{A \cdot f^2 \cdot k_\delta^2 \cdot \delta^{10} \cdot D^4})} \geq E_3, \tag{8}$$

Проведенные исследования позволили установить, что напряженность $E_3$ электрического поля, обеспечивающая стабильное зажигание дуги, составляет в среднем 7,6 В/мм, а коэффициент $k_a = 10^{-6}$. Тогда зависимость (8) с учетом полученных значений может быть записана в следующем виде:

$$E = k_в E_0 \geq E_3 = 7{,}6 \quad В/мм, \tag{9}$$

где $k_в$ – безразмерный коэффициент, комплексно учитывающий влияние изменения расстояния между угольным электродом и упрочняемой поверхностью, соответствующего толщине затвердевшего слоя пасты, и параметры колебаний электрода, равный:

$$k_в = (1 + 2{,}9 \cdot k_a \sqrt[3]{A \cdot f^2 \cdot k_\delta^2 \cdot \delta^{10} \cdot D^4})^{-1}, \tag{10}$$

$E_0$ – напряженность электрического поля при неколеблющемся электроде, равная отношению $E_0 = \left(U_0 - (U_к + U_a)\right) / \delta$, В/мм.

Анализ зависимости (10) показывает следующее:

– с увеличением толщины затвердевшего слоя пасты влияние колебаний электрода на напряженность электрического поля нелинейно снижается (рисунок 2, а). При этом, в связи с увеличением толщины затвердевшего слоя пасты, еще в большей мере уменьшается напряженность электрического поля (рисунок 2, б);

– учитывая свойства затвердевшего слоя пасты, а также требуемую для зажигания дуги при колебаниях угольного электрода напряженность электрического поля при реализации процесса КВДУ, к наиболее рациональной толщине затвердевшего слоя пасты с позиций зажигания дуги можно отнести величины $\delta$ = 2,2…2,4 мм (рисунок 2, б).

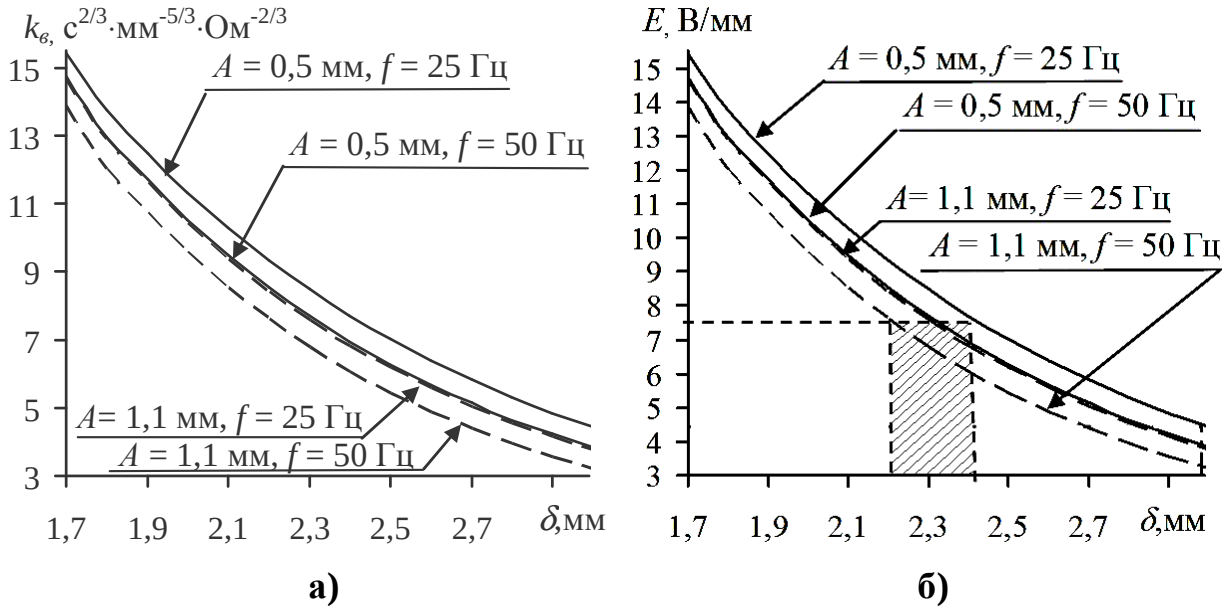



Рисунок 2 – Изменение коэффициента $k_в$ (а) и напряженности электрического поля $E$ (б) при увеличении толщины $\delta$ слоя затвердевшей пасты

**В третьей главе «Программа, оборудование и методы экспериментальных исследований»** приведены программа и методики экспериментальных исследований. Для проведения исследований использовали образцы, изготовленные из конструкционной рессорно-пружинной стали 65Г ГОСТ 14959. При выборе материала исходили из того, что указанная сталь используется для изготовления большинства стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий. КВДУ образцов осуществляли на установке ВДГУ-2. В состав установки входит инверторный источник тока, пульт управления и вибратор для закрепления в нем угольного электрода. При КВДУ использовали электроды диаметром 8 мм.

В качестве матрицы металлокерамических паст использовали стальной порошок ПГ-10Н-01 ТУ У 319-19-004. Выбор данного порошка в качестве матрицы обусловлен тем, что его используют для наплавки износостойких покрытий на детали машин различного назначения. В качестве керамических компонентов паст использовали карбид бора $B_4C$ ГОСТ 5744, оксид алюминия $Al_2O_3$ ГОСТ

8136 и оксид кремния $SiO_2$ ГОСТ 9428. Для улучшения стабильности горения электрической дуги в состав паст добавляли криолит $Na_3AlF_6$ ГОСТ 10561. Связующим веществом являлся 50% водный раствор клея ПВА ГОСТ 18992. Пасты готовили путем механического смешения входящих в их состав компонентов в различных соотношениях. Далее пасты наносили на образцы и высушивали при температуре 90…95°С до затвердевания.

Толщину и микротвердость металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ, определяли на поперечных шлифах с использованием компьютеризированного микротвердомера КМТ-1. В качестве математической модели, описывающей зависимость толщины металлокерамического покрытия от влияющих факторов, выбрана статистическая регрессионная модель. Для получения адекватной модели был поставлен и проведен полный 2-х уровневый 4-х факторный эксперимент. Металлографические исследования проводились с использованием металлургического микроскопа OLYMPUS GX51, а также автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus с системой микроанализа INCA Energy 350 XT.

Лабораторные испытания на изнашивание проводили по методу «гильзы» с использованием вертикально-сверлильного станка типа 2Н135. В качестве абразивного материала использовали кварцевый песок размером 0,16…0,32 мм. Эксплуатационные испытания упрочненных КВДУ стрельчатых лап проводились на примере стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н на суглинистых почвах. При проведении испытаний контролировалось изменение линейных размеров (износ) носовой части стрельчатых лап и ширины их крыльев. Одновременно с упрочненными на культиватор устанавливали и серийные неупрочненные лапы. Агротехническая оценка упрочненных КВДУ стрельчатых лап проводилась в соответствии с рекомендациями ОСТ 10.4.2-01.

**В четвертой главе «Анализ экспериментальных данных»** представлены результаты проведенных экспериментальных исследований и дан их анализ.

На основании проведенных исследований и анализа литературных данных в качестве основных факторов, влияющих на толщину металлокерамического покрытия, были выбраны следующие: $X_1$ – толщина слоя металлокерамической пасты, мм; $X_2$ – содержание матричного порошка, %; $X_3$ – сила тока, А; $X_4$ – амплитуда колебаний угольного электрода, мм. Для установления влияния выбранных факторов на толщину металлокерамического покрытия был проведен регрессионный анализ. Окончательно уравнение регрессии приняло следующий вид:

$$Y=-4{,}24+1{,}97X_1+0{,}05X_2+0{,}06X_3-0{,}02X_1X_2-0{,}02X_1X_3-0{,}0007X_2X_3+0{,}0003X_1X_2X_3+1{,}03\cdot 10^{-5}X_2X_3X_4 \quad (11)$$

Анализ уравнения регрессии показал, что основное влияние на изменение толщины металлокерамического покрытия оказывает толщина слоя металлоке-

рамической пасты (рисунок 3). Изменение содержания матричного порошка и силы тока при КВДУ оказывает меньшее влияние на толщину металлокерамического покрытия. Наряду с линейными эффектами, значимыми оказались эффекты взаимодействия $X_1X_2$, $X_1X_3$, $X_2X_3$, $X_1X_2X_3$, $X_2X_3X_4$, подбор которых также обеспечивает достижение наибольшей толщины металлокерамического покрытия.

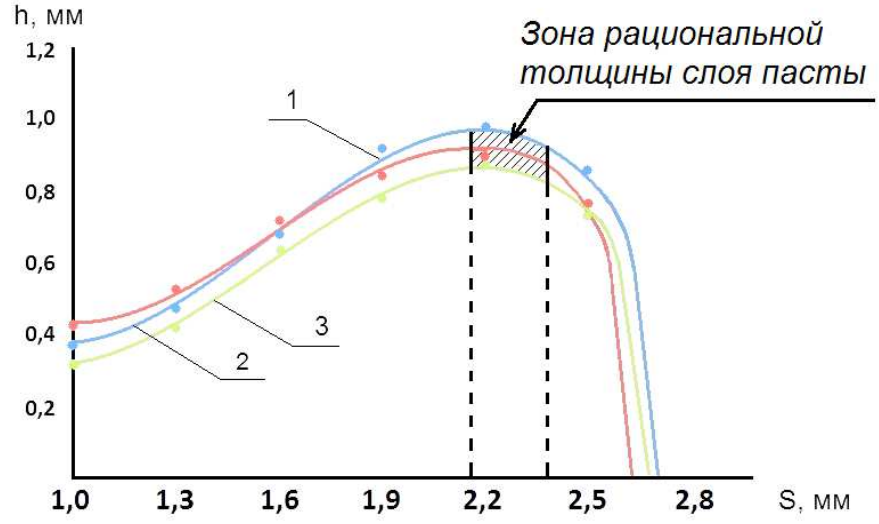



Рисунок 3 – Изменение толщины h металлокерамического покрытия в зависимости от толщины S слоя пасты. Составы паст: матричный порошок – 60%, керамические компоненты – 30%, криолит – 10%. Используемые керамические компоненты: 1 – $B_4C$; 2 – $Al_2O_3$; 3 – $SiO_2$

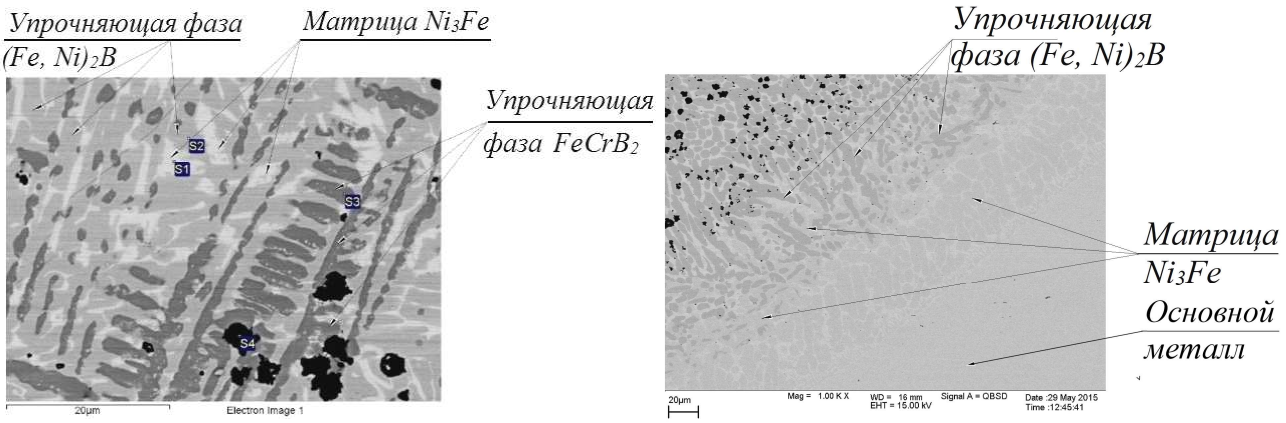
Результаты проведенных исследований показали, что наибольшая толщина металлокерамического покрытия (0,9…1,0 мм) достигается при толщине слоя пасты 2,2…2,3 мм (рисунок 3). При увеличении толщины слоя пасты свыше 2,5 мм толщина металлокерамического покрытия начинает резко снижаться, а его сплошность – ухудшаться. При толщине слоя пасты 2,6…2,7 мм и более сплошное качественное металлокерамическое покрытие на упрочняемой поверхности не образуется. Это связано с тем, что при значительной толщине слоя пасты напряженность электрического поля падает до значений, при которых зажечь дугу становится невозможно. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтверждают выдвинутые теоретические предположения относительно рациональной толщины слоя пасты, при которой возможно стабильное зажигание дуги при КВДУ.

Основное влияние на микротвердость металлокерамических покрытий оказывают керамические компоненты пасты, при этом с увеличением их содержания в составе пасты микротвердость покрытия также возрастает. Наибольшую микротвердость (на поверхности покрытия она достигает 1110…1120 HV, а на границе с основным металлом – 790…795 HV) имеют покрытия, полученные с использованием пасты, содержащей 60% матричного порошка ПГ-10Н-01, 30% карбида бора и 10% криолита на следующих режимах: сила тока – 75 А, частота и амплитуда колебаний угольного электрода – 25 Гц и 0,5 мм соответственно.

Более высокие значения микротвердости металлокерамических покрытий, полученные на пастах, содержащих карбид бора, можно объяснить тем, что в

их структуре присутствуют упрочняющие фазы $(Fe, Ni)_2B$ и $FeCrB_2$ (рисунок 4, а), расположенные в матрице железа и никеля, образовавших между собой твердый раствор $Ni_3Fe$. Данные упрочняющие фазы представлены в виде пластинчатых зерен толщиной 1…4 мкм и длиной более 100 мкм, колониально расположенных по всему объему покрытия. Это и обеспечивает покрытию высокую микротвердость.

При приближении к границе раздела металлокерамического покрытия с основным металлом в покрытии остается только упрочняющая фаза $(Fe, Ni)_2B$ (рисунок 4, б). Размеры зерен данной упрочняющей фазы составляют 5…10 мкм, а при приближении к металлической подложке уменьшаются до 2…5 мкм, что объясняется более интенсивным теплоотводом в зоне подложки. Этим можно объяснить и изменение микротвердости металлокерамического покрытия по его глубине.

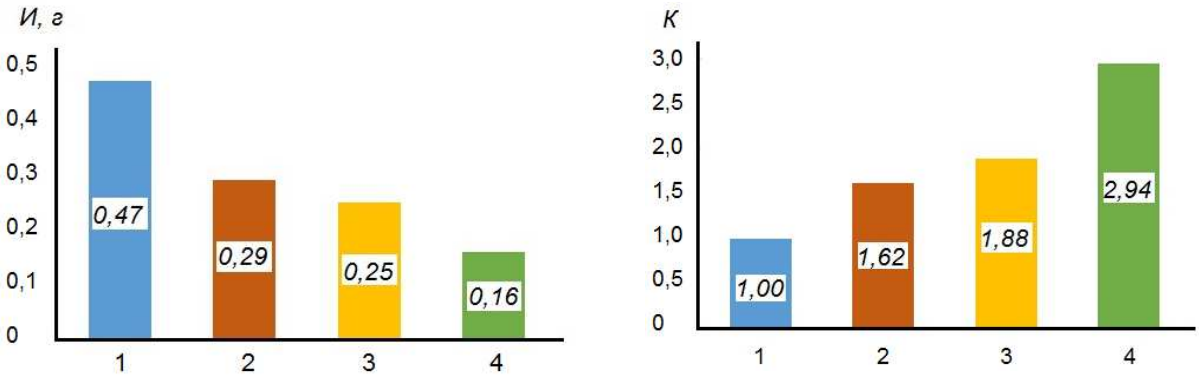



**а)** **б)**

Рисунок 4 – Микроструктура металлокерамического покрытия (а) и на границе раздела покрытия с основным металлом (б)

Проведенные исследования микроструктуры металлокерамического покрытия также позволили установить, что железо, которое образуется при расплавлении как матричного порошка ПГ-10Н-01, так и основного металла, наблюдается по всей глубине металлокерамического покрытия. По мере приближения к основному металлу концентрация железа повышается, а концентрация остальных элементов (например, никеля и хрома) снижается. Такое распределение структурных составляющих обеспечивает высокую адгезионную прочность металлокерамического покрытия и металлической основы.

Результаты проведенных лабораторных испытаний на изнашивание показали, что наибольший средний износ (0,47 г) имеют неупрочненные эталонные образцы из стали 65Г (рисунок 5, а). Образцы, упрочненные КВДУ, имеют значительно меньшие износы. При этом минимальный износ (0,16 г) и максимальную относительную износостойкость (2,94) обеспечивают покрытия, полученные на пастах, содержащих карбид бора (рисунок 5, б).




**а)** **б)**

Рисунок 5 – Износ (а) и относительная износостойкость (б) эталонных образцов (1) и образцов, упрочненных КВДУ с использованием паст, содержащих по 30% $SiO_2$ (2), $Al_2O_3$ (3), $B_4C$ (4)

Результаты эксплуатационных испытаний стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н показали, что серийные неупрочненные лапы достигают своего предельного состояния (износ носка 50 мм) и подлежат замене при наработке 34 га (рисунок 6, кривая 1). В то же время стрельчатые лапы, упрочненные КВДУ с лицевой и тыльной стороны, при аналогичной наработке имеют износ носовой части 23,8 мм и 20,7 мм соответственно (рисунок 6, кривые 2, 3). Таким образом, упрочненные КВДУ стрельчатые лапы обладают в среднем в 2,1 и 2,4 раза более высокой износостойкостью, чем серийные лапы. Износ крыльев испытуемых стрельчатых лап по ширине оказался гораздо ниже, чем носовой части. Так, износ крыльев серийных неупрочненных лап при достижении ими предельного состояния составил в среднем 19 мм. После КВДУ износ крыльев стрельчатых лап значительно снижается и составляет в среднем 6 мм.

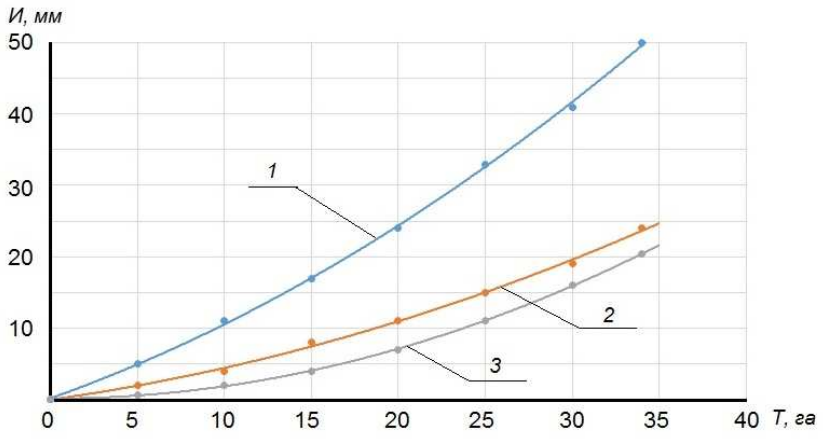



Рисунок 6 – Зависимость износа (И) носка стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н от наработки (Т): 1 – серийная неупрочненная лапа; 2 – лапа, упрочненная КВДУ с лицевой стороны; 3 – лапа, упрочненная КВДУ с тыльной стороны

Результаты агротехнической оценки упрочненных КВДУ стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н показали, что степень подрезания ими сорных растений удовлетворяет агротехническим требованиям обработки почвы.

**В пятой главе «Технологический процесс КВДУ и его экономическая оценка»** на основании комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический процесс КВДУ режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий (на примере стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н). Разработанная технология включает следующие основные операции: зачистку режущей кромки и носовой части лапы, приготовление металлокерамической пасты, ее нанесение и высушивание до затвердевания, КВДУ режущей кромки лапы, контроль качества полученного металлокерамического покрытия, консервацию и упаковку лапы. Стрельчатая лапа культиватора КШУ-12Н, упрочненная с тыльной стороны с использованием разработанной технологии, представлена на рисунке 7.

Расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 872200 рублей при упрочнении 2000 лап культиваторов типа КШУ-12Н. Срок окупаемости – 0,4 года.

Рисунок 7 – Стрельчатая лапа культиватора КШУ-12Н, упрочненная КВДУ с использованием разработанной технологии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача повышения износостойкости стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий металлокерамическими покрытиями, получаемыми на режущих поверхностях лап при КВДУ. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Установлено, что напряженность $E$ электрического поля при КВДУ зависит от толщины $\delta$ слоя затвердевшей металлокерамической пасты, сопротивления $R$ затвердевшего слоя пасты перед зажиганием дуги, а также от амплитуды $A$ и частоты $f$ колебаний угольного электрода. Наибольшее влияние на напряженность $E$ оказывает толщина $\delta$ затвердевшего слоя пасты. Зависимость изменения сопротивления $R$ слоя пасты от его толщины носит степенной характер с показателем степени 5. Увеличение амплитуды $A$ и частоты $f$ приводит к снижению напряженности $E$ на 20…25 %.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена толщина слоя металлокерамической пасты, составляющая 2,2…2,3 мм, которая позволяет обеспечить устойчивое зажигание электрической дуги при КВДУ и

формирование металлокерамического покрытия требуемого качества. Расхождение теоретических расчётов и экспериментальных данных не превышает 5%.

3. Установлены закономерности изменения толщины и физико-механических свойств металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ на пастах, содержащих в качестве керамических компонентов оксиды алюминия и кремния, а также карбид бора. На основании полученных закономерностей определены рациональный состав металлокерамической пасты и режимы КВДУ: стальной порошок ПГ-10Н-01 (матрица) – 60 %, карбид бора – 30 %, криолит – 10 %, сила тока – 75 А, частота и амплитуда колебаний угольного электрода – 25 Гц и 0,5 мм соответственно. При использовании данной пасты и указанных режимов упрочнения толщина металлокерамического покрытия составляет 0,9…1,0 мм, микротвердость на поверхности покрытия – 1110…1120 HV, на границе с основным металлом – 790…795 HV, микротвердость упрочненного основного металла – в среднем 580…620 HV.

4. Сравнительными лабораторными испытаниями на изнашивание установлено, что наибольший средний износ (0,47 г) имеют неупрочненные эталонные образцы из стали 65Г. Образцы, упрочненные КВДУ, имеют значительно меньшие износы. При этом минимальный износ (0,16 г) и наибольшую относительную износостойкость (2,94) обеспечивают покрытия, полученные на пастах, содержащих карбид бора.

5. Эксплуатационные испытания, проведенные на суглинистых почвах, показали, что серийные неупрочненные стрельчатые лапы культиватора КШУ-12Н достигают своего предельного состояния (износ носовой части 50 мм) при наработке 34 га, а лапы, упрочненные КВДУ с тыльной стороны, при аналогичной наработке имеют износ носовой части 20,7 мм. Таким образом, упрочненные КВДУ стрельчатые лапы обладают в среднем в 2,4 раза более высокой износостойкостью, чем серийные лапы. Износ крыльев серийных неупрочненных лап при достижении ими предельного состояния составил в среднем 19 мм. После КВДУ износ крыльев стрельчатых лап значительно снижается и составляет в среднем 6 мм.

6. Разработан и предложен производству технологический процесс КВДУ режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий, апробированный на примере упрочнения стрельчатых лап культиватора КШУ-12Н. Технология позволяет упрочнять стрельчатые лапы широкой номенклатуры практически без ограничения по их массе и конфигурации и может быть реализована на предприятиях различных форм собственности. Новизна разработанной технологии подтверждена патентами РФ на изобретения № 2532602, № 2535123, № 2540316. Использование предлагаемой технологии в производстве особенно актуально с позиций импортозамещения на рынке запасных частей.

7. Технология КВДУ режущих поверхностей стрельчатых лап почвообрабатывающих орудий внедрена в СПК «Сеньково» Глазуновского района Орловской области, а также рекомендована Департаментом сельского хозяйства Орловской области к внедрению на предприятиях АПК региона. Годовой

экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 872200 тыс. рублей при упрочнении 2000 лап культиваторов типа КШУ-12Н при сроке окупаемости 0,4 года.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Виноградов В.В. Анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.В. Виноградов // Техника и оборудование для села. – 2013. – №10. – С. 33-36.

2. Виноградов В.В. Упрочнение рабочих органов машин, работающих в абразиве [Текст] / Н.В. Титов, Н.Н. Литовченко, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев, В.В. Виноградов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т.111. Часть 2. – С. 86-88.

3. Виноградов В.В. К вопросу применения металлокерамических материалов для упрочнения лап культиваторов [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, Н.Н. Литовченко, В.В. Виноградов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т.113. – С. 364-367.

4. Виноградов В.В. Влияние керамических компонентов пасты на твердость упрочненных карбовибродуговым методом поверхностей [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.В. Виноградов // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.118. – С. 140-145.

5. Виноградов В.В. Результаты производственных испытаний стрельчатых лап зарубежной почвообрабатывающей техники, упрочненных методом КВДУ [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.В. Виноградов // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.119. – С. 170-175.

6. Виноградов В.В. Исследование микроструктуры композиционных металлокерамических покрытий, полученных карбовибродуговой наплавкой [Текст] / А. В. Коломейченко, Н.В. Титов, В.В. Виноградов, А.М. Столин, П.М. Бажин // Технология машиностроения. – 2016. – №9. – С. 5-8.

### Статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

7. Виноградов В.В. Особенности зажигания электрической дуги при карбовибродуговом упрочнении рабочих органов сельскохозяйственных машин [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.В. Виноградов // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 4. – С. 34-38.

8. Виноградов В.В. Исследование влияния режимов и параметров карбовибродугового упрочнения на толщину металлокерамического покрытия [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.В. Виноградов, Н.С. Чернышов // Техника и оборудование для села. – 2016. – №9. – С. 34-37.

**Патенты**

9. Пат. 2532602 Российская Федерация, МПК C23C8/28, B23K9/04. Способ упрочнения деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания / Н.В. Титов, Н.Н. Литовченко, А. В. Коломейченко, В.Н. Коротков, В.В. Виноградов; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Орл. гос. аграр. ун-т». - №2013101863/02; заявл. 15.01.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 14. – 5 с.

10. Пат. 2535123 Российская Федерация, МПК C23C8/74. Способ упрочнения лезвий рабочих органов машин / Н.В. Титов, Н.Н. Литовченко, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев, В.В. Виноградов.; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Орл. гос. аграр. ун-т». - № 2013111230/02; заявл. 08.07.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34. – 5 с.

11. Пат. 2540316 Российская Федерация, МПК B23P6/00, A01B15/04, B23K9/04. Способ восстановления лапы культиватора с одновременным упрочнением ее рабочей поверхности / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, Н.Н. Литовченко, В.Н. Коротков, В.В. Виноградов.; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Орл. гос. аграр. ун-т». - № 2013131342/02; заявл. 08.07.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. – 5 с.

**Статьи в материалах конференций и научных журналах**

12. Виноградов В.В. Электровибродуговая наплавка металлокерамических покрытий - перспективный способ упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст] / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, Н.Н. Литовченко, В.В. Виноградов // Сборник научных трудов по мат. Международной научно-практической конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте-2012». Том 2. Транспорт. – Одесса: КУПРИЕНКО. – 2012. – С. 35-37.

13. Виноградов В.В. Повышение ресурса лап культиваторов вибродуговой наплавкой с применением металлокерамики [Текст] / Н.В. Титов, В.В. Виноградов, И.А. Петриков // Агротехника и энергообеспечение. – 2014. – №1. – С. 321-326.

14. Виноградов В.В. Результаты эксплуатационных испытаний упрочненных металлокерамическими материалами стрельчатых лап зарубежных посевных комплексов [Текст] / Н.В. Титов, В.В. Виноградов // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-

практической конференции (15-17 октября 2015 г.). – Мичуринск. – 2015. – С. 291-297.

15. Виноградов В.В. Технология повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственной техники [Текст] / В.В. Виноградов // Актуальные проблемы XXI века: сб. статей III международной научно-практической конференции (17 октября 2015 г.). – Москва. – 2015. – С. 96-99.

16. Виноградов В.В. Импортозамещающая технология упрочнения стрельчатых лап почвообрабатывающих машин [Текст] / Н.В. Титов, В.В. Виноградов, Д.А. Слободчиков // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 1 (16). Москва. – С. 138-141.

17. Виноградов В.В. Исследование технического состояния стрельчатых лап широкозахватных культиваторов типа КШУ, упрочненных методом КВДУ [Текст] / В.В. Виноградов // Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы: материалы XII Международной научно-практической конференции (30 марта 2016 г. - 1 апреля 2016 г.). – Ставрополь. 2016. – С. 315-320.

18. Виноградов В.В. Восстановление и упрочнение стрельчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами [Текст] / В.В. Виноградов // Молодежь и XXI век – 2016: материалы VI Международной молодежной научной конференции: в 4-х томах (25-26 февраля 2016 г.). Курск. 2016. – С. 89-94.

19. Виноградов В.В. Исследование зажигания дуги при упрочнении рабочих органов машин карбовибродуговым методом [Текст] / В.В. Виноградов // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 4 (19). – С. 322–327.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю. Телефон (473) 224-39-39, 8-900-924-5638, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.