



# ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС МАШИН

## MACHINERY TECHNICAL SERVICE

**Том 62 № 1 2024**

**Vol. 62 N 1 2024**

Научно-практический журнал «Технический сервис машин» является правопреемником издания «Труды ГОСНИТИ», основанного в 1963 году. Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).

Scientific-practical journal «Machinery technical service» was founded in 1963. The founder and publisher is the Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM» (FSBSI FSAC VIM).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-72932 от 25.05.2018 г.

Proceedings are registered with the Federal Service for Supervision in the Area of Communications of Information Technologies and Mass Communications (Roskomnadzor) ПИ №ФС77-72932 от 25.05.2018.

Адрес издателя, редакции и типографии:  
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5, стр. 1.

Actual address of the publisher, editorial office and printing house:  
109428, Moscow, 1 st Institutsky pass., 5. bld. 1.

Тел. 8 (495) 371-21-44; 8 (499) 174-88-11; e-mail: tsmvim@mail.ru; valpal-1938@mail.ru

Phone: 8 (495) 371-21-44; 8 (499) 174-88-11; e-mail: tsmvim@mail.ru; valpal-1938@mail.ru

Свидетельство о регистрации: ПИ №ФС77-72932 от 25.05.2018 года

Certificate of registration:  
ПИ №ФС77-72932 from 25.05.2018.

Выходит 4 раза в год (Свободная цена).

It turns out 4 times a year (Free price).

Дата выхода в свет 22.12.2023 г.,

The format is 60x84 / 8. Circulation 100 copies.

Формат 60 x 84/8. Объем 16,5 п.л.,

Тираж 100 экз., заказ 959.

Отпечатано в типографии ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Printed in the printing house of the FSBSI FSAC VIM

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

**Черноиванов Вячеслав Иванович**

доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник ФНАЦ ВИМ (главный редактор, председатель редакционной коллегии)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Лялякин Валентин Павлович**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФНАЦ ВИМ (заместитель председателя)

**Соловьев Сергей Александрович**

доктор технических наук, профессор, академик РАН, заместитель главного ученого секретаря президиума РАН

**Дорохов Алексей Семенович**

доктор технических наук, профессор, академик РАН, заместитель директора ФНАЦ ВИМ

**Денисов Вячеслав Александрович**

доктор технических наук, заведующий отделом ФНАЦ ВИМ

**Зиганшин Булат Гусманович**

доктор технических наук, профессор, проректор по учебно-воспитательной работе, заведующий кафедрой, Казанский государственный аграрный университет

**Кешуов Сейтказы Асылсеитович**

доктор технических наук, профессор, ректор, Казахский НИИМЭСХ, Республика Казахстан

**Габитов Ильдар Исмагилович**

доктор технических наук, профессор, ректор, Башкирский ГАУ

**Ценч Юлия Сергеевна**

доктор технических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора ФНАЦ ВИМ

**Спицын Иван Алексеевич**

доктор технических наук, профессор кафедры «Технический сервис машин», Пензенский ГАУ

**Сенин Петр Васильевич**

доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева

**Ерохин Михаил Никитьевич**

доктор технических наук, профессор, академик РАН, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

**Попов Владимир Дмитриевич**

доктор технических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства»

**Тошболтаев Махамад Тожалиевич**

доктор технических наук, профессор, зам. директора по науке и инновациям, Научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Республика Узбекистан

**Утениязов Пулат Айбатович**

доктор философии по техническим наукам, главный специалист, Научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Республика Узбекистан

## EDITOR-IN-CHEF:

**Chernoivanov Vyacheslav Ivanovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the FSAC VIM (Chairman of the Editorial Board)

## EDITORIAL BOARD:

**Lyalyakin Valentin Pavlovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Chief Researcher of the FSAC VIM (Deputy Chairman)

**Solovyev Sergey Aleksandrovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Chief Scientific Secretary of the Presidium of the Russian Academy of Sciences

**Dorokhov Alexey Semenovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director of the FSAC VIM

**Denisov Vyacheslav Aleksandrovich**

Dr.Sc.(Eng.), Head of Department at the FSAC VIM

**Ziganshin Bulat Gusmanovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Vice-Rector for Educational Affairs, Head of Department, Kazan State Agrarian University

**Keshuov Seytkazy Asylseitovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Rector, Kazakh Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, Republic of Kazakhstan

**Gabitov Ildar Ismagilovich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Rector, Bashkir State Agrarian University

**Tsench Yulia Sergeevna**

Dr.Sc.(Eng.), Chief Researcher, Deputy Director of the FSAC VIM

**Spitsyn Ivan Alekseevich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor of Machine Maintenance Department, Penza State Agrarian University

**Senin Petr Vasil'evich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Vice-Rector for Science and Research, N.P. Ogarev Mordovian State University

**Erokhin Mikhail Nikit'evich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

**Popov Vladimir Dmitrievich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Supervisor at the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production

**Toshboltaev Makhamad Tozhalievich**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Deputy Director for Research and Innovation, Research Institute of Agricultural Mechanization, Republic of Uzbekistan

**Uteniyazov Pulat Aibatovich**

Ph.D.(Eng.), Chief Specialist, Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization, Republic of Uzbekistan

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ. РЕМОНТ</b>	<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ</b>
<i>Васильев С.А., Алексеев В.В., Филиппов В.П., Васильев А.А., Ильичев В.В.</i> О цифровой эксплуатации вилочного погрузчика на складе АПК ..... 5	<i>Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А., Баранова Н.С., Боровик Т.Н.</i> Оценка влияния технологических режимов плазменного нанесения покрытий на толщину формируемого слоя ..... 44
<i>Курносоев А.Ф., Гуськов Ю.А., Долгушин А.А.</i> Определение поцилиндровой мощности двигателя внутреннего сгорания при работе в режиме свободного разгона ..... 12	<i>Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.</i> Восстановление изношенных поверхностей трения скольжения газодинамическим напылением медно- цинковых покрытий ..... 51
<i>Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Вергун В.И.</i> Совершенствование технологии диагностирования опорных узлов трансмиссии автомобиля КамАЗ-55111 ..... 21	<i>Берденников Е.А.</i> Исследование процесса изнашивания шеек коленчатого вала, восстановленных установкой стальных полукольцевых накладок ..... 60
<i>Севрюгина Н.С., Фомин А.Ю., Рысев М.Д., Шугаев А.Ю.</i> Ресурсбережение в системе услуг сервисной кастомизации транспортно-технологических машин ..... 28	<i>Лялякин В.П., Аулов В.Ф.</i> Технологические особенности восстановления шеек коленчатых валов в связи с их старением в процессе эксплуатации ..... 67
<i>Габитов И.И., Неговора А.В., Фархитов М.Н., Фаюршин А.Ф., Иофинов П.А., Зайнуллин Р.Х., Шайхетдинов Ф.Р.</i> Обеспечение эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники с учетом региональных особенностей ..... 36	<i>Романов И.В.</i> Применение вторичных порошковых материалов для восстановления бронзовых деталей гидромашин ..... 73
	<i>Агеева Е.В., Серебровский В.В., Семькин В.А., Серникова О.С.</i> Восстановление деталей автотракторной техники гальванопокрытиями с дисульфидом молибдена ... 80
	<i>Задорожний Р.Н., Кудряшова Е.Ю., Романов И.В.</i> Анализ материалов деталей, работающих в агрессивных средах перерабатывающих производств ..... 86
	<i>Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Сидоркин О.А., Пустоветов А.В.</i> Пластическая твердость композиционных покрытий на основе хрома ..... 94
	<i>Денисов В.А., Попов Н.А.</i> Исследование износостойкости гильз цилиндров, восстановленных керамическим покрытием ..... 101
	<i>Дорохов А.С., Свиридов А.С., Тужилин С.П.</i> Исследование физико-механических свойств полиуретановых компаундов для оценки возможности их применения в мембранно-поршневом насосе ..... 107
	<b>ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ</b>
	<i>Ерохин М.Н., Скороходов Д.М.</i> Вклад академика ВАСХНИЛ А.И. Селиванова в подготовку научно-педагогических и агроинженерных кадров России ..... 113
	<i>Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В., Рябова Н.Ю.</i> Истоки развития агроинженерной науки в России . . 121
	<i>Годлевская Е.В.</i> Преемственность учения В.П. Горячкина в трудах научных школ Южного Урала ..... 130

## CONTENTS

MAINTENANCE. REPAIR	RESTORATION AND HARDENING OF DETAILS
<i>Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Filippov V.P., Vasiliev A.A., Ilyichev V.V.</i> About the digital operation of a forklift in an agricultural warehouse. . . . . 5	<i>Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Baranova N.S., Borovik T.N.</i> Influence of technological modes of plasma coating on the thickness of the layer formed . . . . . 44
<i>Kurnosov A.F., Guskov Yu.A., Dolgushin A.A.</i> Determination of the cylinder-by-cylinder power of an internal combustion engine operating in free acceleration mode. . . . . 12	<i>Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Pugachev M.S.</i> Restoration of worn sliding friction surfaces by gas-dynamic spraying of copper-zinc coatings . . . . . 51
<i>Pastukhov A.G., Timashov E.P., Vergun V.I.</i> Improvement of diagnostics of vehicle transmission support units KamAZ-55111 . . . . . 21	<i>Berdennikov E.A.</i> Wear process in crankshaft journals restored by installing steel semi-ring linings . . . . . 60
<i>Sevryugina N.S., Fomin A.Yu., Rysev M.D., Shugaev A.Yu.</i> Resource saving in the service customization of transport and technological machines . . . . . 28	<i>Lyalyakin V.P., Aulov V.F.</i> Technological features of recovering crankshaft journals due to their aging during operation . . . . . 67
<i>Gabitov I.I., Negovora A.V., Farkhshatov M.N., Fayurshin A.F., Iofinov P.A., Zainullin R.H., Shaikhetdinov F.R.</i> Ensuring the operational reliability of agricultural machinery taking into account regional features . . . . . 36	<i>Romanov I.V.</i> The use of secondary powder materials for the restoration of bronze parts of hydraulic machines. . . . . 73
	<i>Ageeva E.V., Serebrovsky V.V., Semykin V.A., Sernikova O.S.</i> Restoration of parts of automotive equipment by electroplating with molybdenum disulfide. . . . . 80
	<i>Zadorozhniy R.N., Kudryashova E.Yu., Romanov I.V.</i> Analysis of materials working in aggressive environments of processing industries . . . . . 86
	<i>Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V.</i> Plastic hardness of composite coatings based on chrome . . . . . 94
	<i>Denisov V.A., Popov N.A.</i> The wear resistance of cylinder liners restored by ceramic coating . . . . . 101
	<i>Dorokhov A.S., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P.</i> Study of physical and mechanical properties polyurethane compounds for evaluation the possibility of their use in a diaphragm piston pump . . . . . 107
	<b>THE HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY</b>
	<i>Erokhin M.N., Skorokhodov D.M.</i> Contribution of Academician of VASKhNIL A.I. Selivanov in the training of scientific, pedagogical and agricultural engineering personnel in Russia. . . . . 113
	<i>Zaitseva N.L., Aldoshin N.V., Ryabova N.Yu.</i> The origins of the agricultural engineering science in Russia . . . . . 121
	<i>Godlevskaya E.V.</i> Continuity of V.P. Goryachkin's teaching in the works of scientific schools of the Southern Urals . . . . . 130



## О ЦИФРОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВИЛОЧНОГО ПОГРУЗЧИКА НА СКЛАДЕ АПК



<sup>1,2</sup>Сергей Анатольевич Васильев, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: vsa\_21@mail.ru;

<sup>1</sup>Виктор Васильевич Алексеев, доктор технических наук, профессор;

<sup>1</sup>Владимир Петрович Филиппов, кандидат физико-математических наук, доцент;

<sup>2</sup>Алексей Анатольевич Васильев, кандидат технических наук, доцент;

<sup>2</sup>Валерий Вячеславович Ильичев, кандидат технических наук, доцент

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары,  
Чувашская Республика Российская Федерация

<sup>2</sup>Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,  
г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация

**Реферат.** В настоящей статье рассмотрели вопросы оптимизации перемещения вилочного погрузчика при его цифровой эксплуатации на отдельном складе агропромышленного комплекса. Цифровая эксплуатация вилочных погрузчиков на складе агропромышленного комплекса позволит реализовать интеллектуальный процесс использования и управления транспортно-технологическими средствами для выполнения различных видов складских операций с применением цифровых технологий (Цель исследования) Обосновать необходимость внедрения системы цифровой эксплуатации техники на складах агропромышленного комплекса на различных режимах его работы. (Материалы и методы) Показали отдельные траектории перемещения вилочного погрузчика на складе с использованием инновационных технологий, предложили эмпирические зависимости, которые дают наглядное представление о возможных путях следования от места погрузки до места выгрузки и наоборот. (Результаты и обсуждение) Экспериментальные исследования по реализации и внедрению системы цифровой эксплуатации вилочных погрузчиков проводили на предприятии СХПК «Оринино» Моргаушского района Чувашии. Определили, что в результате использования новой цифровой системы, имея информацию о конкретном складе, задании на перевозку, массу, габариты и прочие характеристики груза можно составить эвентуальную оптимизированную траекторию движения погрузчика как комбинацию линейных и нелинейных участков. При этом на всем протяжении пути задаются скорость и величина допустимого угла поворота, а заранее составленная для конкретного склада база с данными позволяет «подсказать направление» погрузчику на эвентуальный оптимальный путь при возникновении неизбежных для реального случая эксплуатации различного рода отклонений от намеченной траектории. (Выводы) Интеллектуальное управление вилочным погрузчиком с применением системы цифровой эксплуатации обеспечит непосредственное влияние на повышение его производительности на складах агропромышленного комплекса.

**Ключевые слова:** система, цифровая эксплуатация, вилочный погрузчик, склад, агропромышленный комплекс.

**Для цитирования:** Васильев С.А., Алексеев В.В., Филиппов В.П., Васильев А.А., Ильичев В.В. О цифровой эксплуатации вилочного погрузчика на складе АПК // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 5-11. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-5-11. EDN: IUAZLT.

Scientific article

## ABOUT THE DIGITAL OPERATION OF A FORKLIFT IN AN AGRICULTURAL WAREHOUSE

<sup>1,2</sup>Sergey A. Vasiliev, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>1</sup>Viktor V. Alekseev, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>1</sup>Vladimir P. Filippov, Ph.D.(Eng.), associate professor;

<sup>1</sup>Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Chuvash Republik, Russian Federation<sup>2</sup>Nizhny Novgorod state engineering and economic university, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation

**Abstract.** *In this paper, we have considered the issues of optimizing the movement of a forklift during its digital operation in a separate warehouse of the agro-industrial complex. Digital operation of forklifts in the warehouse of the agro-industrial complex will make it possible to implement an intelligent process of using and managing transport and technological means to perform various types of warehouse operations using digital technologies (Research purpose) The research purpose is substantiating the need of introducing a system of digital operation of equipment in warehouses of the agro-industrial complex in various modes of its operation. (Materials and methods) They showed individual trajectories of the forklift truck in the warehouse using innovative technologies, offered empirical dependencies that give a clear idea of the possible routes from the place of loading to the place of unloading and vice versa. (Results and discussion) Experimental studies on the implementation and implementation of the digital operation system of forklifts were carried out at the enterprise «Orinino» of the Morgaushsky district of Chuvashia. It was determined that as a result of using the new digital system, having information about a specific warehouse, transportation assignment, weight, dimensions and other characteristics of the cargo, it is possible to create an eventual optimized loader trajectory as a combination of linear and nonlinear sections. At the same time, the speed and the value of the permissible angle of rotation are set all along the way, and a database with data compiled in advance for a specific warehouse allows you to «suggest the direction» to the loader to the eventual optimal path in the event of various kinds of deviations from the intended trajectory that are inevitable for the real case of operation. (Conclusions) Intelligent control of a forklift truck using a digital operation system will provide a direct impact on increasing its productivity in the warehouses of the agro-industrial complex.*

**Keywords:** *system, digital operation, forklift, warehouse, agro-industrial complex.*

**For citation:** *Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Filippov V.P., Vasiliev A.A., Ilyichev V.V. About the digital operation of a forklift in an agricultural warehouse. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 05-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-5-11. EDN: IUAZLT.*

**В** течение последних лет имеется некоторая тенденция к увеличению числа хранилищ плодоовощной продукции, удовлетворяющих всем современным требованиям. Количество новых складов для продукции АПК в ближайшие годы будет также расти, поскольку в начале 2023 г. начал реализовываться новый федеральный проект по развитию овощеводства и картофелеводства. В программе запланировано увеличение производства картофеля в России на 2025 г. в сравнении с 2020 г. до 15% и овощей открытого грунта до 15,5%, что в целом составит более 14 млн т продукции (Еремеев И.Д., Фиоктистова В.В., Кузнецов А.Д. и др. Экономическая эффективность внедрения технологии интернета вещей в овощехранилища навального типа // АПК России: образование, наука, производство: сборник статей V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием. 2023. С. 178-181). Данные хранилища имеют передовое

оборудование, необходимое для качественного хранения корнеплодов. Чтобы улучшить работу складов, мировые онлайн-гиганты, например *Alibaba* и *Amazon*, вложили крупные инвестиции в автоматизированные технологии складского хозяйства. Важным фактором служит то, что технологии автоматизации последнего поколения обеспечивают гибкость при работе с различными типами продуктов питания, обеспечивая эффективное хранение, обработку и сортировку больших потоков сельскохозяйственной продукции [1]. Чтобы еще больше улучшить работу складов, на предприятиях АПК сочетают автоматизированные технологии с цифровизацией и подключением информационных платформ.

Примерами новых технологий, актуальных для складских операций, являются искусственный интеллект (ИИ), Интернет вещей (ИВ), киберфизические системы (КФС), большие данные, 5G и интеллектуальный видеонализ (ИВА) [2]. Это соче-

тание технологий иногда называют интеллектуальным складированием, термином, который привлекает все большее внимание, часто в связи с индустрией 4.0, логистикой 4.0 и ИВ [3].

В наших исследованиях были разработаны вспомогательные программные приложения интеллектуальных технологий для цифровой эксплуатации техники в точном земледелии, которые можно использовать в складском хозяйстве сельскохозяйственных предприятий [4, 5].

Для складских операций вилочные погрузчики считаются самыми дорогими машинами. Требования к вилочным погрузчикам и затраты на их эксплуатацию на складах АПК имеют решающее значение. Авторы, анализирующие работу вилочных погрузчиков, пересматривают способы управления эксплуатацией ресурсов с помощью интеграции *RFID* или способы оптимизации поездок за счет внедрения многозадачного подхода на складе [6].

Внедрение радиочастотного процесса и применение многозадачности рассматриваются как передовые решения, направленные на повышение производительности. Многие исследователи рассчитывали маршрут по минимальному пути, а также разработали систему планирования оптимальных маршрутов вилочных роботизированных погрузчиков для комплектации и прямой доставки продукции на производственную линию по алгоритмам Дейкстры [7].

Система маршрутизации получает информацию о задачах транспортировки, которые необходимо выполнить, например, количество поддонов, приоритеты и т. д. На основе этой информации система выбирает минимальное количество вилочных погрузчиков, необходимое для выполнения задачи. На основе топологической карты окружающей среды система рассчитывает маршруты для выбранных погрузчиков, проверяя возможные столкновения и пробки.

Цифровая эксплуатация вилочных погрузчиков на складе АПК позволит реализовать интеллектуальный процесс использования и управления транспортно-технологическими средствами для выполнения различных видов складских операций с применением цифровых технологий [8]. Однако существующие исследования в области цифровой эксплуатации вилочных погрузчиков на складе АПК фрагментарны, когда дело доходит до их сути [9].

Эту проблему важно устранить, чтобы объединить исследования и дать возможность анализировать закономерности на более целостном уровне

не вместо того, чтобы сосредотачиваться только на конкретных применениях определенных технологий. Другой важной проблемой в исследованиях является отсутствие ясности в отношении того, как внедрять цифровую эксплуатацию вилочного погрузчика. На пути к цифровой эксплуатации погрузчиков сельскохозяйственные склады работают в разных контекстах и, следовательно, пойдут разными путями, например, или сразу полной автономной эксплуатации погрузчиков, или интеллектуального управления оператором техники. Сегодня существующие исследования не дают никаких объяснений того, как и почему различные компании выстраивают свои технические и технологические решения в соответствии с определенными складскими операциями во время перехода от аналоговой эксплуатации к цифровой.

**Цель исследования** – обосновать необходимость внедрения системы цифровой эксплуатации техники на складах агропромышленного комплекса на различных режимах его работы.

**Материалы и методы.** При эксплуатации вилочного погрузчика возможны нарушение устойчивости и вероятность опрокидывания техники в поперечном направлении. Потеря устойчивости может существенно возникнуть на горизонтальной площадке при резком развороте с приподнятым грузом. Оператор не всегда может учесть вероятность возникновения такой ситуации при выборе режима работы вилочного погрузчика, особенно начинающий и неопытный сотрудник.

Предварительные исследования проводили на территории СХПК «Орино» Моргаушского района Чувашской Республики с применением вилочных погрузчиков СИЛАНТ при перевозке паллет, заполненных продукцией (зерно, овощи, удобрения и т. д.). Конструктивный минимальный радиус поворота вилочного погрузчика ПД-2.0 СИЛАНТ составляет 2190 мм. Мы использовали цифровую IP-камеру *HiWatch DS-I400(C)* с разрешением 4 Мп. Частота кадров равна 20 за секунду при максимальном разрешении. Для обработки видеоданных использовали современные кодеки, которые эффективно сжимают файлы без потери качества. Масса груза на паллете составляла 550 кг.

Для реализации системы цифровой эксплуатации техники рассмотрели эксплуатационные динамические свойства вилочного погрузчика на территории склада. Смоделировали максимально быстрое изменение (в данном случае возрастание) скорости вдоль пути по складской территории  $v(s)$ .

Величину скорости, как и ускорение погрузчи-

ка  $a(s)$ , можно легко получить при мониторинге техники в плане сверху, например, путем обработки видеоматериалов по разгону погрузчика и, при необходимости, аппроксимировать какой-либо кривой (рис. 1).

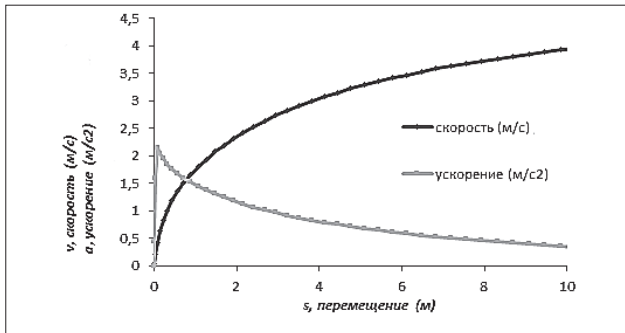


Рис. 1. Существенное изменение скорости и ускорения вилочного погрузчика по пути следования на складе  
Fig. 1. Significant change in the speed and acceleration of the forklift along the way in the warehouse

Анализ графических зависимостей показывает, что на пути 10 м скорость погрузчика может достигать 4 м/с, а ускорение кратковременно увеличиться от 0 до 2,15 м/с<sup>2</sup> и далее медленно снизиться до 0,36 м/с. Зная частоту кадров, можно легко пересчитать зависимости координат от времени  $s(t)$ ,  $v(t)$  и  $a(t)$ , а также, при необходимости, получить аппроксимирующие зависимости и построить графики (рис. 2).

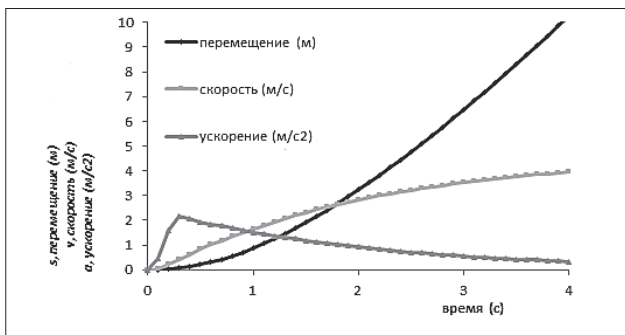


Рис. 2. Существенное изменение пути, скорости и ускорения вилочного погрузчика на складе по времени  
Fig. 2. Significant change in the way, speed and acceleration of the forklift truck in the warehouse by time

По графическим зависимостям прослеживается существенное изменение скорости и ускорения в начальный временной период движения вилочного погрузчика, например, через 4 с оператор проедет около 10 м.

Появляющийся при непрямолинейном движении погрузчика эффект от возникновения нормального ускорения совместно с тангенциальным уско-

рением не должен приводить к опрокидыванию погрузчика или схода груза. Это значит, что полное ускорение не должно превышать некоторого значения  $a_{кр}$ , определяемого силами трения, высотой центра тяжести, скоростью, радиусом поворота и пр.:

$$a_{кр} = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}, \quad (1)$$

где  $a_n$  – поступательное ускорение вилочного погрузчика, м/с;  $a_\tau$  – боковое ускорение вилочного погрузчика, м/с.

Следовательно, необходимо выполнение условия:

$$\frac{v^2}{R} < a_{кр}, \quad (2)$$

где  $v$  – поступательная скорость погрузчика, м/с;  $R$  – радиус поворота погрузчика по определенной траектории, м.

Таким образом, получили неравенство:

$$R > \frac{v^2}{a_{кр}}. \quad (3)$$

При возрастании/убывании скорости радиус траектории должен соответственно меняться – возрастать/убывать.

**Результаты и обсуждение.** Используя классические формулы механики и экспериментально полученную зависимость  $v(s)$  для вилочного погрузчика СИЛАНТ, построили траекторию его движения в каждой точке (1, 2, 3 и т. д.), соответствующую критическим значениям ускорения (рис. 3).

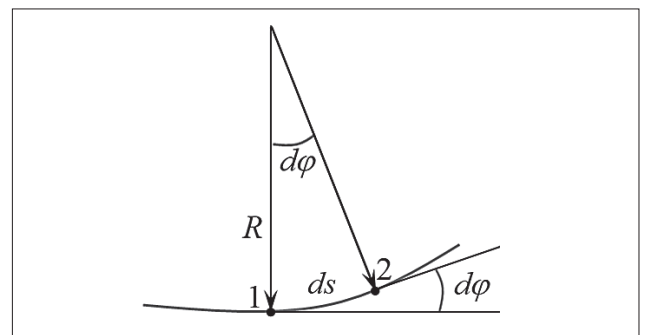


Рис. 3. Определение траектории перемещения погрузчика через радиус кривизны

Fig. 3. Determination of the trajectory of the forklift through the radius of curvature

Как известно, радиус кривизны криволинейной траектории определяется из выражения:

$$\frac{1}{R} = \lim_{ds \rightarrow 0} \frac{d\phi}{ds}, \quad (4)$$



где  $d\varphi$  – приращение угла по радиусу поворота, град.;  $ds$  – приращение пути по радиусу поворота, м.

Привязав к декартовой системе координат, запишем:

$$R = \frac{(1+(y')^2)^{2/3}}{|y''|}, \quad (5)$$

где  $y$  – координата вилочного погрузчика, м.

При малых значениях величины  $d\varphi$  можно заменить дугу  $ds$  прямой и, зная координаты точки 1, рассчитать координаты точки 2:

$$x_{i+1} = x_i + ds \cdot \cos \varphi_i, \quad (6)$$

$$y_{i+1} = y_i + ds \cdot \sin \varphi_i, \quad (7)$$

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + d\varphi_i. \quad (8)$$

Таким образом, информация об изменении скорости вдоль пути следования погрузчика  $v(s)$  позволяет, рассчитывая из накладываемых ограничений радиус кривизны  $R$  и, соответственно,  $d\varphi$ , составить криволинейную траекторию движения погрузчика. Это критическая траектория, на которой превышение значений  $d\varphi$  выше допустимых приводит к опрокидыванию или соскальзыванию груза. При криволинейном движении динамические свойства по устойчивости вилочного погрузчика можно охарактеризовать состоянием неустойчивого равновесия.

Под действием центробежной силы и силы тяжести выравняются опрокидывающий и удерживающий моменты, которые определяются по известным выражениям [10].

Условие устойчивости для заданного радиуса поворота будет соблюдаться при определенном критическом значении скорости перемещения вилочного погрузчика.

Аналогично, с уменьшением скорости погрузчика при торможении, можно соответственно уменьшать и радиус разворота. В качестве примера расчета траектории по предложенным формулам и экспериментальным данным, отображенным на рисунках 1 и 2, приведем следующую траекторию с началом движения из состояния покоя – точки  $O(0,0)$  (рис. 4).

Анализ графических кривых показывает, что при движении с оператором погрузчик без груза будет выполнять поворот радиусом 2288 мм, а при транспортировании груза массой 550 кг – 2569 мм. Таким образом, радиус поворота погрузчика будет увеличиваться на 11% под действием увеличенной центробежной силы. Маневренность вилочного погрузчика во многом зависит от его габаритных размеров и радиуса поворота.

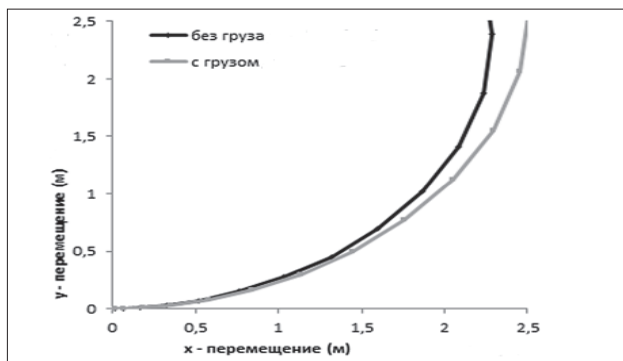


Рис. 4. Криволинейная траектория перемещения погрузчика с началом движения из состояния покоя: 1 – без груза; 2 – с грузом  $m$ ;

Fig. 4. Curved trajectory of the forklift movement with the beginning of movement from stop: 1 – without load; 2 – with load  $m$

Можно лучше использовать площадь склада или хранилища при наименьших этих параметрах, поскольку вилочный погрузчик может выполнять складские операции в ограниченном пространстве.

Экспериментальные исследования по реализации и внедрению системы цифровой эксплуатации вилочных погрузчиков проводили на предприятии СХПК «Оринино» Моргаушского района Чувашии. Имея информацию о конкретном хранилище, задании на перевозку, массе, габаритах и прочих характеристиках груза на поддоне, составили эвентуальную оптимизированную траекторию движения вилочного погрузчика от места погрузки до места выгрузки как комбинацию линейных и нелинейных участков (рис. 5).

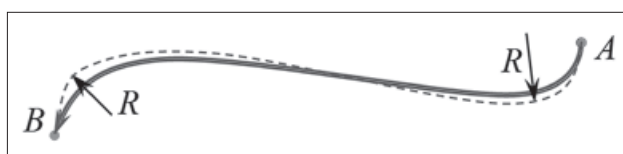


Рис. 5. Криволинейная траектория перемещения вилочного погрузчика на зернохранилище СХПК «Оринино» от места погрузки до места выгрузки:

- эвентуальная траектория перемещения без груза
- эвентуальная траектория перемещения с грузом  $m$

Fig. 5. The curved trajectory of the forklift moving to the grain storage of the Orinino agricultural complex from the loading point to the unloading point:

- eventual trajectory of movement without load;
- the eventual trajectory of movement with a load  $m$

В системе цифровой эксплуатации вилочных погрузчиков на всем протяжении пути задаются скорость и величина допустимого угла поворота. По заранее составленной для конкретного склада



базе с данными возможно «подсказать направление» вилочного погрузчика на эвентуальный оптимальный путь при возникновении неизбежных для реального случая эксплуатации различного рода отклонений от намеченной траектории [11]. Внедрение системы цифровой эксплуатации обеспечит непосредственное повышение производительности техники на складах АПК [12].

**Выводы.** Рассмотрели вопросы оптимизации перемещения вилочного погрузчика и обосновали необходимость внедрения системы цифровой эксплуатации техники на складах агропромышленного комплекса на различных режимах его работы. Показали отдельные траектории перемещения вилочного погрузчика на складе с использованием инновационных технологий, предложили эмпирические зависимости, которые дают наглядное представление о возможных путях следования от места погрузки до места выгрузки и наоборот. Экспериментальные исследования по реализации и внедрению системы цифровой эксплуатации вилочных погрузчиков провели на предприятии СХПК «Орино» Моргаушского района Чувашии. Определили, что в результате использования новой цифровой системы, имея информацию о конкретном складе, задании на перевозку, массе, габаритах и прочих характеристиках груза можно составить эвентуальную оптимизированную траекторию движения погрузчика как комбинацию линейных и нелинейных участков. При этом на всем протяжении пути задаются как скорость, так и величина допустимого угла поворота, а заранее составленная для конкретного склада база с данными позволяет «подсказать направление» погрузчику на эвентуальный оптимальный путь при возникновении неизбежных для реального случая эксплуатации различного рода отклонений от намеченной траектории. Интеллектуальное управление вилочным погрузчиком с применением системы цифровой эксплуатации обеспечит непосредственное влияние на повышение его производительности на складах агропромышленного комплекса.

### Библиографический список

1. Kembro J., Eriksson E., Norrman A. *Sorting out the sorting in omnichannel retailing. Journal of Business Logistics*. 2022. Vol. 43. N4. 1-30. <https://doi.org/10.1111/jbl.12305>.
2. Mahroof K. *A human-centric perspective exploring the readiness towards smart warehousing: the case of a large retail distribution warehouse. International Journal*

*of Information Management*. 2019. N45. 176-190.

3. Карпунин М.Ю. *Хранение картофеля в модернизируемых хранилищах советского периода на основе автоматизации и цифровизации основных процессов // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК*. 2021. N3(11). С. 20-28. EDN: DMGKNU.
4. Васильев С.А. *Интеллектуальная технология контроля качества обработки почвы в системе точного земледелия // Земледелие*. 2022. N3. С. 36-41.
5. Васильев С.А., Чучкалов С.И., Александров Р.И. и др. *Исследование изменения природно-климатических условий и физических свойств почвы на агроландшафтной катене склоновых земель // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2019. N4(56). С. 26-35.
6. Gnoni M.G., Elia V., Rollo A. *RFID technology for an intelligent public transport network management. International Journal of RF Technologies*. 2012. Vol. 3. N1. 1-13. DOI: 10.3233/RFT-2011-014.
7. Мельникова Т.Е., Мельников С.Е., Асманов И.А., Фаддеева Е.Ю. *Роботизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2021. N7. С. 65-67. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-07-12.
8. Семенов Д.А., Воронцов И.И. *Факторы, оказывающие влияние на процесс автоматизации вилочного погрузчика // Нанотехнологии: наука и производство*. 2023. N1. С. 66-69. EDN: RYVVPF.
9. Семенов Д.А. *Современные тенденции развития вилочных погрузчиков // Грузовик*. 2021. N5. С. 36-40. EDN: KHB TSA.
10. Николаев М.Е., Несмиянов И.А., Фомин С.Д. *Обоснование структуры манипулятора мобильного погрузчика сеток с овощами // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2019. N2(54). С. 389-397. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-46.
11. Годжаев З.А., Гришин А.П., Пехальский И.А. и др. *Развитие работ по созданию робототехники сельхозназначения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. N119. С. 488-502. EDN: WAFKTN.
12. Годжаев З.А., Хорошенков В.К., Гончаров Н.Т. и др. *Тенденции развития средств механотроники, автоматизации и роботизации для синтеза новых высокопроизводительных технологий и машин в сельском хозяйстве // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2018. N3(329). С. 4-16. EDN: XXRSTB.

### References

1. Kembro J., Eriksson E., Norrman A. *Sorting out the sorting in omnichannel retailing. Journal of Business*

Logistics. 2022. Vol. 43. N4. 1-30. <https://doi.org/10.1111/jbl.12305>.

2. Mahroof K. A human-centric perspective exploring the readiness towards smart warehousing: the case of a large retail distribution warehouse. *International Journal of Information Management*. 2019. N45(5). 176-190. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.11.008.

3. Karpukhin M.Yu. Storage of potatoes in modernized storage facilities of the soviet period based on automation and digitalization of main processes. *Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in Agriculture*. 2021. N3(11). 20-28 (In Russian). EDN: DMGKNU.

4. Vasiliev S.A. Intelligent technology of quality control of tillage in the system of precision farming. *Zemledelie*. 2022. N3. 36-41 (In Russian). DOI: 10.24412/0044-3913-2022-3-36-41.

5. Vasilyev S.A., Chuckalov S.I., Alexandrov R.I., et al. The study of changes in natural and climate conditions and physical properties of soil on the agrolandscape catena of slope lands. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp*. 2019. N4(56). 26-35 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-2.

6. Gnoni M.G., Elia V., Rollo A. RFID technology for an intelligent public transport network management. *International Journal of RF Technologies*. 2012. Vol. 3. N1. 1-13. DOI: 10.3233/RFT-2011-014.

7. Mel'nikova T.E., Mel'nikov S.E., Asmanov I.A., Faddeeva E.Yu. Robotization and automation of loading and unloading operations. *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)* 2021. N7. 65-67 (In Russian). DOI: 10.36535/0236-1914-2021-07-12.

8. Semenov D.A., Vorontsov I.I. Factors influencing the process of forklift automation. *Nanotechnology: Science and production*. 2023. N1. 66-69 (In Russian). EDN: RYVVPF.

9. Semenov D.A. Current trends in the development of forklifts. *Truck*. 2021. N5. 36-40 (In Russian). EDN: KHB TSA.

10. Nikolaev M.E., Nesmiyanov I.A., Fomin S.D. Justification of the manipulator structure of the mobile loader of containers with vegetables. *Proceedings of lower Volga Agro-university complex: Science and higher education*. 2019. N2(54). 389-397 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-46.

11. Godzhayev Z.A., Grishin A.P., Pekhalskiy I.A., et al. Development work on the creation of robotics farmland. *Polythematic online scientific journal of Kuban state agrarian university* 2016. N119. 488-502. EDN: WAFKTN. (In Russian).

12. Godzhayev Z.A., Khoroshenkov V.K., Goncharov N.T., et al. Development trends of mechanotronics, automation and robotization for synthesis of new high

productivity technologies, and machines in agriculture. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2018. N3(329). 4-16 (In Russian). EDN: XXRSTB.

#### **Заявленный вклад соавторов**

Васильев С.А. – формулирование основной концепции исследования;

Алексеев В.В. – разработка методологии исследования;

Филиппов В.П. – табличное и графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования;

Васильев А.А. – описание результатов и формирование выводов исследования, анализ литературы;

Ильичев В.В. – подготовка начального варианта текста, формирование выводов, анализ литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

Vasiliev S.A. – formulation of the main concept of the study;

Alekseev V.V. – development of research methodology; Filippov V.P. – tabular and graphical representation of the results, description of the results and formation of conclusions of the study;

Vasiliev A.A. – description of the results and formation of conclusions of the study, literature analysis;

Ilyichev V.V. – preparation of the initial manuscript, formation of conclusions, analysis of literature.

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 13.12.2023**

**Статья принята к публикации 01.01.2024**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЦИЛИНДРОВОЙ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОГО РАЗГОНА



*Антон Федорович Курносков, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: anton\_kurnosov@mail.ru;*

*Юрий Александрович Гуськов, доктор технических наук, доцент;  
Алексей Александрович Долгушин, доктор технических наук, доцент*

*Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация*

**Реферат.** Эффективная эксплуатация транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения невозможна без своевременной оценки энергетических показателей работы их двигателей внутреннего сгорания. Крутящий момент и мощность каждого цилиндра можно оценить по величине реакций опоры двигателя при работе в режиме свободного разгона с частью отключенных цилиндров. (Цель исследования) Усовершенствовать способ определения поцилиндровой мощности двигателя внутреннего сгорания в режиме свободного разгона по величине реакций на его опорах. (Материалы и методы) Разработали методiku оценки мощности каждого цилиндра двигателя по величине реакций на его опорах и текущего значения частоты вращения коленчатого вала. Провели экспериментальные исследования на дизельном четырехцилиндровом четырехтактном двигателе Д-243. При выполнении программы исследований поэтапно отключали подачу топлива в один или два цилиндра, задавали режим работы двигателя свободный разгон и фиксировали возникающие в опорах силы с помощью тензометрических датчиков и комплекта измерительной аппаратуры. Применили следующие методы исследований: априорное ранжирование, регрессионный и расчетный анализ. (Результаты и обсуждение) Установили, что величина максимального крутящего момента достигается в диапазоне частоты вращения коленчатого вала 1298-1467 оборотов в минуту и составляет 285 нанометров при работе всех цилиндров, 219 – при работе трех цилиндров и 148 – при работе двух цилиндров. Максимальное значение эффективной мощности составило 57,8 киловатт при работе всех цилиндров, 34 – при работе трех цилиндров и 22 – при работе двух цилиндров. Определили при оценке мощности двигателя во время поочередного отключения одного из цилиндров, что эффективная мощность двигателя изменяется в интервале 33-33,4 киловатт. (Выводы) Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при внедрении способа оперативного контроля мощности каждого цилиндра двигателя внутреннего сгорания в условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, эффективная мощность, режим работы свободный разгон, цифровые средства управления, цикловая подача топлива, реакции опор двигателя.

**Для цитирования:** Курносков А.Ф., Гуськов Ю.А., Долгушин А.А. Определение поцилиндровой мощности двигателя внутреннего сгорания при работе в режиме свободного разгона // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 12-20. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-12-20. EDN: VAJMXO

Scientific article

## DETERMINATION OF THE CYLINDER-BY-CYLINDER POWER OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATING IN FREE ACCELERATION MODE

*Anton F. Kurnosov, Ph.D.(Eng.) associate professor;  
Yuriy A. Guskov, Dr.Sc.(Eng.) associate professor;  
Aleksey A. Dolgushin, Dr.Sc.(Eng.) associate professor*



**Abstract.** Efficient operation of transport and technological machines for agricultural purposes is impossible without a timely assessment of the energy performance of their internal combustion engines. The torque and power of each cylinder can be estimated by the magnitude of the reactions of the engine support when operating in free acceleration mode with some of the cylinders disconnected. (Research purpose) The research purpose is improving the method of determining the cylinder-by-cylinder power of an internal combustion engine in the free acceleration mode by the magnitude of the reactions on its supports. (Materials and methods) Developed a methodology for estimating the power of each engine cylinder by the magnitude of the reactions on its supports and the current value of the crankshaft speed. Experimental studies were carried out on a diesel four-cylinder four-stroke engine D-243. During the execution of the research program, the fuel supply to one or two cylinders was gradually turned off, the engine operation mode was set to free acceleration, and forces arising in the supports were recorded using strain gauges and a set of measuring equipment. The following research methods were applied: a priori ranking, regression and computational analysis. (Results and discussion) It was found that the maximum torque is reached in the crankshaft speed range of 1298-1467 revolutions per minute and is 285 nanometers when all cylinders are running, 219 – when three cylinders are running and 148 – when two cylinders are running. The maximum value of the effective power was 57.8 kilowatts for all cylinders, 34 for three cylinders and 22 for two cylinders. It was determined when assessing engine power during the alternate shutdown of one of the cylinders that the effective engine power varies in the range of 33-33.4 kilowatts. (Conclusions) The obtained results of experimental studies can be used in the implementation of a method for operational control of the power of each cylinder of an internal combustion engine under operating conditions.

**Keywords:** internal combustion engine, effective power, operating mode free acceleration, digital controls, cyclic fuel supply, reactions of engine supports.

**For citation:** Kurnosov A.F., Guskov Yu.A., Dolgushin A.A. Determination of the cylinder-by-cylinder power of an internal combustion engine operating in free acceleration mode. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 12-20 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-12-20. EDN: VAJMXO.

Эффективная эксплуатация транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения невозможна без своевременной оценки энергетических показателей работы их двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Отклонение текущего значения эффективной мощности ДВС от нормативного значения снижает производительность машинно-тракторного агрегата и повышает удельный расход топлива на 10-15% [1].

В настоящее время существующие методы определения эффективной мощности двигателя внутреннего сгорания можно разделить на стендовые, бестормозные и расчетные. Стендовые методы определения эффективной мощности требуют использования специальных тормозных стендов и комплекта дополнительного оборудования [2].

Измерение мощности двигателя осуществляется при непосредственном его монтаже на стенд, что существенно ограничивает оперативность проведения диагностирования. Широко известны бестормозные методы повышения эффективности работы двигателя на установившихся режимах, ко-

торые нашли широкое применение при оценке эффективности работы цилиндров двигателей с электронной системой управления [3].

Применение цифровых средств управления двигателем для поочередного отключения подачи топлива в один из цилиндров позволило в автоматическом режиме определить эффективность работы каждого цилиндра по снижению частоты вращения коленчатого вала (КВ) ДВС и увеличению цикловой подачи топлива в работающие цилиндры. Недостатком данных методов служит невозможность определения эффективной мощности отдельного цилиндра и двигателя в целом, так как оценка эффективности работы каждого цилиндра проводится относительно измеренных параметров работы других цилиндров.

Расчетные методы оценки эффективности работы современных ДВС интегрированы во встроенные электронные системы управления и диагностирования двигателем и основаны на расчете цикловой подачи топлива, относительно которой вычисляются крутящий момент и мощность двигателя [4].

Данный метод не учитывает полноту сгорания топлива и величину потерь давления в цилиндре на такте сгорания и расширения, что не позволяет достоверно оценивать эффективные показатели двигателей.

Использование цифровых средств измерений при реализации динамических методов определения мощности ДВС позволило авторам В.В. Альту, О.В. Ёлкину, О.Ф. Савченко и С.Н. Ольшевскому разработать и внедрить методику оценки эффективной мощности современных двигателей внутреннего сгорания, в том числе на основе данных бортовой системы диагностирования [5].

При высокой степени оперативности и достаточной точности предложенных решений метод определения эффективной мощности требует оценки приведенного момента инерции вращающихся частей двигателя, что существенно ограничивает его распространение. Методика оценки эффективности работы каждого цилиндра ДВС, предложенная А.С. Гребенниковым, С.А. Гребенниковым и др. на основе оценки ускорения коленчатого вала и мгновенных угловых скоростей элементов трансмиссии, позволяет оперативно оценить техническое состояние и эффективность работы автомобиля в целом без использования сложного оборудования и выполнения трудоемких операций [6, 7]. Основным недостатком данного метода заключается в необходимости получения эталонного ускорения коленчатого вала и эталонного рассогласования мгновенных угловых скоростей элементов трансмиссии для каждого типа двигателя и агрегатов трансмиссии.

Развитие дистанционного мониторинга техники предъявляет высокие требования к информативности диагностических параметров. Передача больших объемов данных от машины к удаленному центру управления нецелесообразна и в ряде случаев невозможна [8].

Предложенные авторами В. Cai, L. Wen, J. Wang, M. Zhang и др. методы оптимизации передаваемого объема диагностической информации, снижения вычислительных операций и самообучения систем диагностирования на основе нейросетей существенно усложняют процесс передачи и обработки данных [9, 10].

Подобные методы могут быть использованы в телематических системах по мере развития дистанционного мониторинга автотракторной техники [11].

Поэтому оценка мощности двигателя на основе величины реакций опор, образуемых за счет действия реактивного крутящего момента, позволит существенно упростить процесс определения

энергетических параметров ДВС, так как измеряемая величина напрямую характеризует эффективность работы каждого цилиндра. Простота реализации и широкая информативность предложенного диагностического параметра снизит объем данных, необходимых для достоверной оценки эффективности работы ДВС и обеспечит возможность его применения в современных системах дистанционного мониторинга сельскохозяйственной техники.

Особую значимость оценка мощности двигателей внутреннего сгорания приобретает при использовании новых видов топлива. Оперативная оценка мощности при производственных испытаниях двигателей, использующих альтернативные виды топлива, позволит достоверно оценить эффективность их работы.

**Цель исследования** – усовершенствовать способ определения поцилиндровой мощности двигателя внутреннего сгорания в режиме свободного разгона по величине реакций на его опорах.

**Материалы и методы.** Исследования выполняли на рядном четырехцилиндровом дизельном двигателе Д-243, широко применяемом в сельскохозяйственном производстве. Передние опоры не имеют жесткой связи с блоком цилиндров и воспринимают только вес передней части ДВС через балансирую опоры, поэтому в условиях проведенных исследований расчет силового воздействия двигателя проводили относительно двух задних опор.

При работе рассматриваемого ДВС в режиме свободного разгона в кривошипно-шатунном механизме формируется множество сил, результат действия которых приводит к изменению ускорения коленчатого вала и равного по величине и обратного по направлению ускорения блока цилиндров ДВС. Для указанного случая справедливо равенство (рис. 1):

$$J_{КВ} \varepsilon_{КВ} = -J_{ДВС} \varepsilon_{ДВС} \quad (1)$$

или

$$M_{КВ} = -M_{ДВС} \quad (2)$$

где  $J_{КВ}, J_{ДВС}$  – моменты инерции вращающихся частей и блока цилиндров ДВС соответственно, приведенные к оси вращения коленчатого вала, кг·м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{КВ}, \varepsilon_{ДВС}$  – ускорения вращающихся частей и блока цилиндров ДВС соответственно, с<sup>-2</sup>;  $M_{КВ}, M_{ДВС}$  – крутящие моменты, возникающие на коленчатом валу и блоке цилиндров ДВС соответственно, Нм.



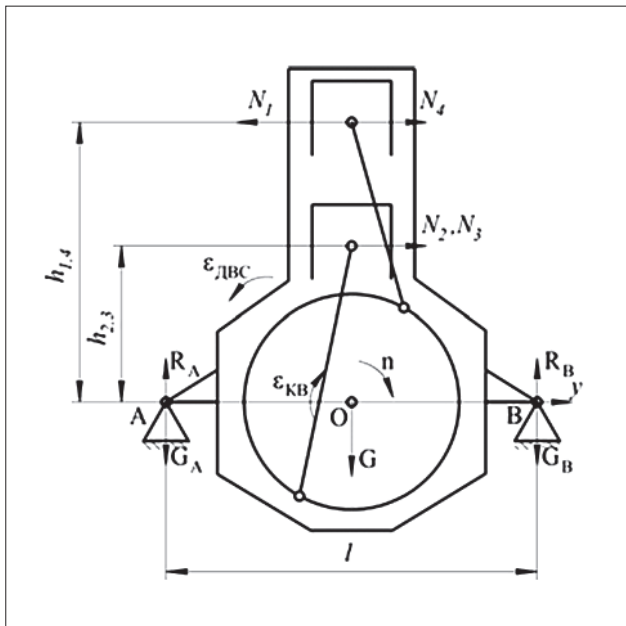


Рис. 1. Схема возникновения реакций опор на такте сгорания и расширения четырехцилиндрового двигателя:

$N_1, N_2, N_3, N_4$  – боковые силы, действующие перпендикулярно на стенки 1, 2, 3 и 4 цилиндров соответственно,  $N_i$ ;  $h_{1,4}, h_{2,3}$  – расстояние от оси поршневого пальца соответственно 1 и 4, 2 и 3 цилиндров до оси вращения коленчатого вала,  $m$ ;  $l$  – расстояние между опорами,  $m$ ;  $R_A, R_B$  – реакции опоры А и опоры В соответственно,  $H$ ;  $G$  – вес двигателя,  $H$ ;  $G_A, G_B$  – вес двигателя, действующий на опору А и опору В соответственно,  $H$ ;  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $min^{-1}$

Fig. 1. Diagram of the support reactions on the combustion and expansion stroke of a four-cylinder engine:

$N_1, N_2, N_3, N_4$  – lateral forces acting perpendicular to the walls of the 1st, 2nd, 3rd and 4th cylinders, respectively,  $N_i$ ;  $h_{1,4}, h_{2,3}$  – the distance from the axis of the piston pin, respectively, of the 1st and 4th, as well as the 2nd and 3rd cylinders to the axis of rotation of the crankshaft,  $m$ ;  $l$  – the distance between the supports,  $m$ ;  $R_A, R_B$  – the reaction of the support A and support B, respectively,  $N$ ;  $G$  – the weight of the engine,  $H$ ;  $G_A, G_B$  – the weight of the engine, acting on support A and support B, respectively,  $N$ ;  $n$  – the speed of rotation of the crankshaft,  $min^{-1}$

Ускорение вращающихся частей и блока цилиндров ДВС является аддитивной величиной, зависящей от действия каждого цилиндра, т. е.:

$$\varepsilon_{КВ} = \varepsilon_{КВ}^I + \varepsilon_{КВ}^{II} + \varepsilon_{КВ}^{III} + \varepsilon_{КВ}^{IV}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ДВС} = \varepsilon_{ДВС}^I + \varepsilon_{ДВС}^{II} + \varepsilon_{ДВС}^{III} + \varepsilon_{ДВС}^{IV}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{КВ}^I, \varepsilon_{КВ}^{II}, \varepsilon_{КВ}^{III}, \varepsilon_{КВ}^{IV}$  – ускорение вращающихся частей, возникшее от действия 1, 2, 3 и 4 цилиндров соответственно,  $c^{-2}$ ;

$\varepsilon_{ДВС}^I, \varepsilon_{ДВС}^{II}, \varepsilon_{ДВС}^{III}, \varepsilon_{ДВС}^{IV}$  – ускорение блока цилиндров

ДВС, возникшее от действия 1, 2, 3 и 4 цилиндров соответственно,  $c^{-2}$ .

Неравномерная работа цилиндров двигателя приведет к уменьшению ускорения вращающихся частей и блока цилиндров ДВС, соответственно крутящие моменты  $M_{КВ}$  и  $M_{ДВС}$  также изменятся. Для определения энергетических параметров каждого цилиндра необходимо определить ускорение вращающихся частей или блока цилиндров ДВС, возникающее от действия этого цилиндра, а также моменты инерции  $J_{КВ}$  или  $J_{ДВС}$ .

Определение моментов инерции вращающихся частей и блока цилиндров ДВС представляет собой трудоемкий процесс, что существенно затруднит диагностирование. Ускорение блока цилиндров ДВС можно определить акселерометрами, но действие реакций опор существенно снизит точность показаний. Поэтому в рассматриваемых условиях целесообразно определить крутящий момент относительно реакций опор ДВС, т. е.:

$$R_B = -G_B + \frac{\sum N_i h_j}{l}; \quad (5)$$

$$R_B = -G_B - \frac{\sum N_i h_j}{l}, \quad (6)$$

где  $\sum N_i h_j$  – суммарный крутящий момент, действующий на блок цилиндров ДВС относительно оси вращения коленчатого вала,  $Нм$ .

В уравнениях (5), (6) направление действия суммарного крутящего момента  $\sum N_i h_j$  принято положительным относительно оси вращения коленчатого вала, т. е. направлено против направления вращения часовой стрелки. Вес двигателя остается постоянным на протяжении эксперимента и не влияет на величину крутящего момента в процессе разгона, поэтому в рассматриваемых условиях весом двигателя пренебрегаем, а величину реакций опор запишем в виде:

$$\Delta R_A = -\Delta R_B; \quad (7)$$

$$\Delta R_A = -(N_1 + N_4) \frac{h_{1,4}}{l} - (N_2 + N_3) \frac{h_{2,3}}{l}; \quad (8)$$

$$\Delta R_B = -(N_1 + N_4) \frac{h_{1,4}}{l} - (N_2 + N_3) \frac{h_{2,3}}{l}, \quad (9)$$

где  $\Delta R_A, \Delta R_B$  – изменение реакций соответственно опоры А и опоры В при работе двигателя,  $H$ .

Выражения (8) и (9) равны по величине и противоположны по направлению. Поэтому в условиях эксперимента достаточно определить реакцию одной опоры.

Эффективный крутящий момент двигателя  $M_e$  с учетом выражения (8) определим по формуле:

$$M_e = -(N_1 + N_4) h_{1,4} - (N_2 + N_3) h_{2,3} = \Delta R_A l. \quad (10)$$

Эффективную мощность двигателя  $N_e$  в режиме свободного разгона с частью отключенных цилиндров можно вычислить по формуле:

$$N_e = [-(N_1 + N_4) h_{1,4} - (N_2 + N_3) h_{2,3}] \omega = \Delta R_A l \omega = \Delta R_A l \frac{\pi n}{30}, \quad (11)$$

где  $\omega$  текущее значение угловой скорости вращения  $KB$ ,  $c^{-1}$ .

Таким образом, для определения эффективной мощности ДВС при работе с частью отключенных цилиндров в режиме свободного разгона достаточно найти величину реакций одной из опор и текущую частоту вращения  $KB$ .

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке, включающей в себя дизельный четырехцилиндровый четырехтактный двигатель Д-243 и комплекс измерительного оборудования. Общий вид экспериментальной установки представили на *рисунке 2*.

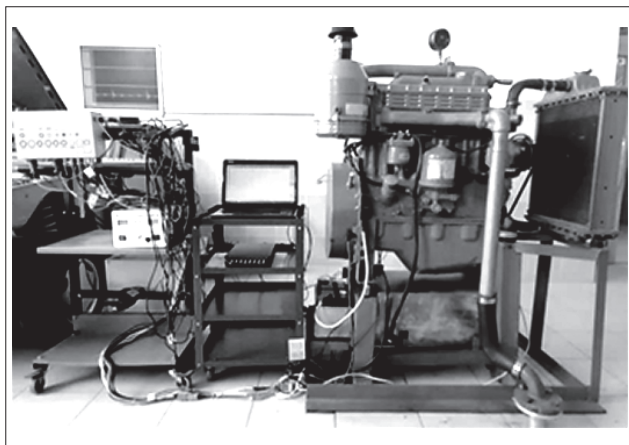


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Fig. 2. General view of the experimental setup

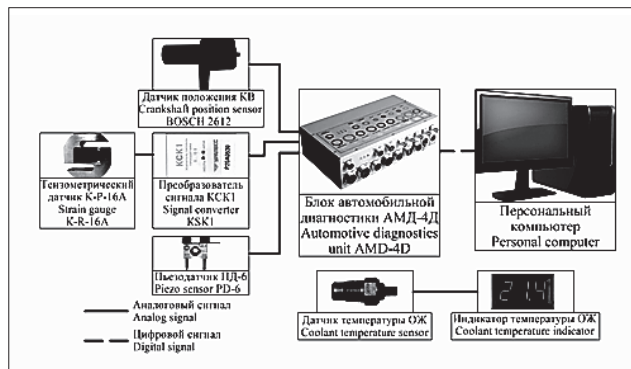


Рис. 3. Структура измерительного комплекса

Fig. 3. Structure of the measuring complex

Комплекс измерительного оборудования состоит из устанавливаемого на заднюю опору двигателя

ля тензометрического датчика К-Р-16А, выходной сигнал которого усиливали в пределах диапазона измерения 0-10 В при помощи преобразователя сигнала КСК1 (*рис. 3*). Текущее значение частоты вращения  $KB$  определяли по показаниям датчика положения коленчатого вала, регистрирующего положение поршня первого цилиндра в верхней мертвой точке. Положение поршня первого цилиндра в верхней мертвой точке конца такта сжатия определяли с учетом показаний пьезоэлектрического датчика ПД-6, устанавливаемого на топливопровод высокого давления первого цилиндра. Аналоговые сигналы от датчиков поступали в блок автомобильной диагностики АМД-4Д, где происходило их преобразование в цифровой вид. Регистрацию, хранение и обработку данных осуществляли на персональном компьютере с помощью пакета прикладных программ *Microsoft Office Excel* и *Statistica*. Для обработки полученной информации применяли методы регрессионного анализа, для определения величины реакций опор использовали расчетный метод. Контроль температуры охлаждающей жидкости осуществляли по показаниям установленного индикатора температуры охлаждающей жидкости.

Экспериментальные исследования проводили в следующем порядке.

1. По величине компрессии оценивали техническое состояние цилиндропоршневой группы, затем по параметрам давления открытия топливных форсунок, качеству распыла и цикловой подаче топлива определяли техническое состояние топливной аппаратуры. При необходимости измеренные параметры доводили до номинальных значений.

2. Включали измерительное оборудование и запускали двигатель, осуществляли его прогрев до момента достижения охлаждающей жидкостью номинальной температуры.

3. Устанавливали минимальную частоту вращения коленчатого вала двигателя  $600 \text{ мин}^{-1}$  и определяли реакции опоры при работе ДВС в режиме свободного разгона поочередно на всех цилиндрах с отключенным цилиндром 1 и с отключенными цилиндрами 1 и 4.

4. Проводили свободный разгон двигателя при работе на трех цилиндрах путем поочередного отключения 1, 2, 3 и 4 цилиндров. Каждый эксперимент проводили пятькратно с одновременной регистрацией измеряемых комплексом параметров и последующей их обработкой.

В условиях эксперимента за начало измерений приняли момент включения максимальной подачи топлива.

**Результаты и обсуждение.** Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили установить, что реакции на опорах двигателя при работе на всех цилиндрах изменяются от 0 до 849 Н за первые 294 мс измерений, затем постепенно уменьшаются до 600 Н на 929 мс измерений и принимают нулевое значение в конце цикла разгона. Среднее за цикл работы двигателя ускорение коленчатого вала изменяется от 0 до 201 с<sup>-2</sup> за первые 508 мс разгона, затем также уменьшается до величины 173 с<sup>-2</sup> на 929 мс измерений и резко снижается в конце цикла разгона (рис. 4).

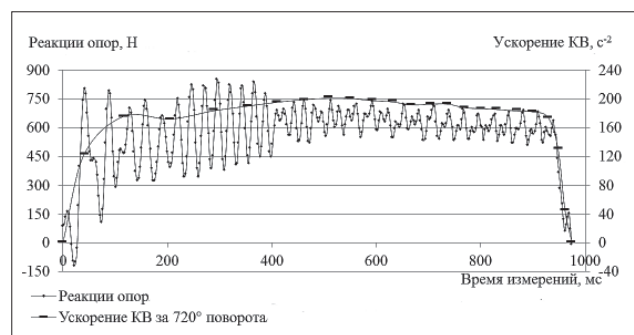


Рис. 4. Осциллограмма реакций опоры двигателя Д-243 и среднее за цикл работы двигателя ускорение КВ в процессе свободного разгона

Fig. 4. Oscillogram of the reactions of the D-243 engine support and the average KV acceleration during the engine operation cycle during free acceleration

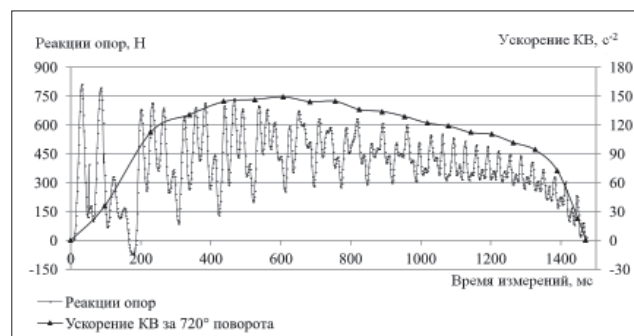


Рис. 5. Осциллограмма реакций опоры двигателя Д-243 и среднее за цикл работы двигателя ускорение КВ в процессе свободного разгона при отключенном первом цилиндре

Fig. 5. Oscillogram of the reactions of the D-243 engine support and the average KV acceleration during the engine operation cycle during free acceleration with the first cylinder turned off

Отключение первого цилиндра двигателя вызывает существенное снижение величины реакций опор и увеличение амплитуды изменения реакций (рис. 5). Величина реакции изменяется от 0 до 809 Н за первые 31 мс измерений и уменьшается до минус 79 Н на 174 мс измерений для неработающего цилиндра. Последующая работа двигателя приво-

дит к уменьшению колебаний реакций, постепенному изменению среднего значения реакций с 450 до 300 Н в интервале измерения 200-1320 мс и резкому снижению реакций в конце цикла разгона. Ускорение КВ изменяется от 0 до 149 с<sup>-2</sup> в период измерения от 0 до 606 мс, постепенно уменьшается до 94 с<sup>-2</sup> на 1389 мс измерений и достигает нулевого значения в конце цикла разгона.

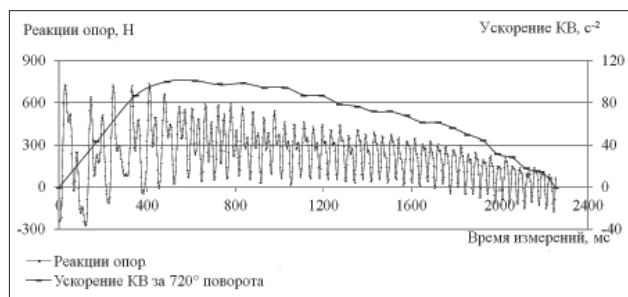


Рис. 6. Осциллограмма реакций опоры двигателя Д-243 и среднее за цикл работы двигателя ускорение КВ в процессе свободного разгона при отключенных первом и четвертом цилиндрах

Fig. 6. Oscillogram of the reactions of the D-243 engine support and the average KV acceleration during the engine operation cycle during free acceleration with the first and fourth cylinders turned off

Отключение двух цилиндров также приводит к увеличению амплитуды реакций и снижению среднего значения величины реакций (рис. 6).

Так, за первые 400 мс измерений средние значения реакций опор изменяются от 0 до 320 Н и затем постепенно уменьшаются до нуля на 2254 мс измерений. Ускорение коленчатого вала изменяется от 0 до 101 с<sup>-2</sup> в период 0-616 мс и постепенно уменьшается до нуля на 2254 мс измерений.

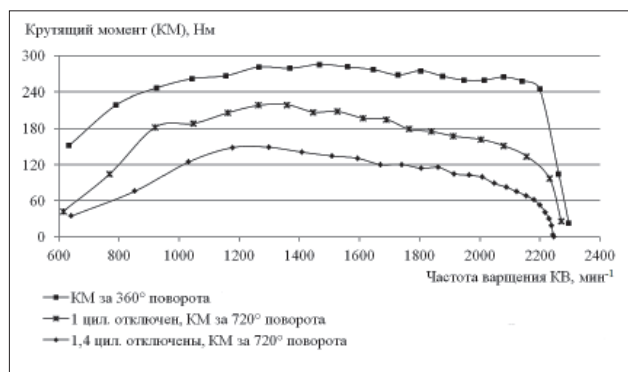


Рис. 7. Зависимость изменения усредненного крутящего момента двигателя от частоты вращения коленчатого вала

Fig. 7. Change in the average engine torque on the crankshaft speed

При работе двигателя на всех цилиндрах в режиме свободного разгона величина крутящего мо-



мента изменяется со 150 до 285 Нм при изменении частоты вращения коленчатого вала с 634 до 1467 мин<sup>-1</sup>, затем происходит постепенное снижение крутящего момента до 244 Нм при частоте вращения КВ 2199 мин<sup>-1</sup> и резкое снижение до 23 Нм при последующем увеличении частоты вращения КВ (рис. 7). При последовательном отключении первого и совместно первого и четвертого цилиндров величина крутящего момента изменяется с 42 до 219 Нм при частоте вращения КВ 615-1358 мин<sup>-1</sup> и с 34 до 148 Нм при частоте вращения КВ 641-1298 мин<sup>-1</sup> соответственно. При последующем увеличении частоты вращения коленчатого вала происходит постепенное снижение крутящего момента до минимального значения. Из графика также видно, что максимальная частота вращения КВ при работе двигателя на всех цилиндрах составляет 2296 мин<sup>-1</sup>, при работе с отключенным первым цилиндром – 2270 мин<sup>-1</sup>, при работе с отключенными первым и четвертым цилиндрами – 2243 мин<sup>-1</sup>.

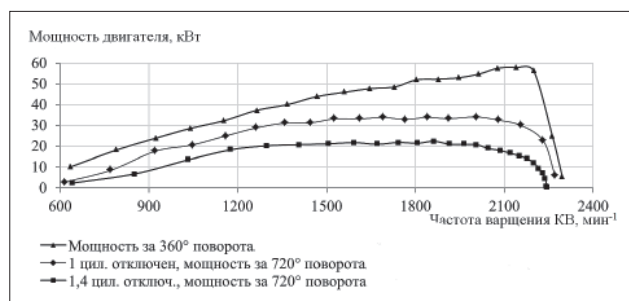


Рис. 8. Изменение эффективной мощности ДВС от частоты вращения коленчатого вала

Fig. 8. Effective power of the internal combustion engine depending on the crankshaft speed

Исчисленная мощность ДВС на основании значений крутящего момента и соответствующих значений частоты вращения коленчатого вала показывает, что при работе на всех цилиндрах мощность двигателя изменяется в интервале от 10 до 57,8 кВт при изменении частоты вращения КВ с 634-2140 мин<sup>-1</sup>, при отключении первого цилиндра в процессе разгона двигателя в диапазоне частоты вращения КВ 614-2004 мин<sup>-1</sup> мощность изменяется с 2,75 до 34 кВт, затем происходит постепенное ее уменьшение до 29 кВт при частоте вращения КВ 2156 мин<sup>-1</sup> и резкое снижение мощности при последующем повышении частоты вращения КВ (рис. 8). При работе двигателя с отключенными первым и четвертым цилиндрами изменение мощности ДВС наблюдается в пределах от 2,32 до 22 кВт при частоте вращения КВ 641-1862 мин<sup>-1</sup>, затем происходит уменьшение мощности ДВС до нуля при

частоте вращения КВ 2243 мин<sup>-1</sup>. Изменения характера зависимости мощности от частоты вращения коленчатого вала при отключении цилиндров объясняется тем, что мощность внутренних потерь двигателя перераспределяется на работающие цилиндры, причем с увеличением частоты вращения коленчатого вала мощность внутренних потерь возрастает и компенсирует эффективную мощность работающих цилиндров.

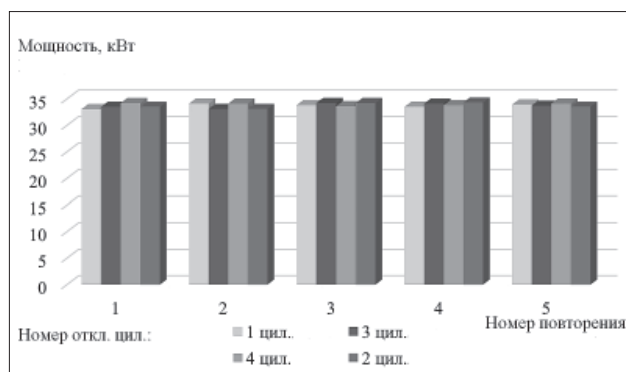


Рис. 9. Мощность ДВС Д-243 в режиме свободного разгона при поочередном отключении цилиндров

Fig. 9. The power of the internal combustion engine D-243 in the free acceleration mode when the cylinders are switched off alternately

Проведенные исследования оценки мощности двигателя в режиме свободного разгона при поочередном отключении одного из цилиндров показали, что эффективная мощность ДВС при работе на трех цилиндрах находится в пределах 33-34,3 кВт независимо от номера отключенного цилиндра, а колебания мощности по цилиндрам не превышает 3,9%, что говорит о равномерной работе цилиндров ДВС в заданных условиях (рис. 9) [12].

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют заключить, что поцилиндровую мощность ДВС можно оценить по диагностическому параметру – величине реакций опор двигателя, обладающей высокой информативностью, простотой измерения и возможностью оперативной ретрансляции в удаленный центр управления [13].

Величина максимального крутящего момента ДВС при работе в режиме свободного разгона достигается в диапазоне частоты вращения коленчатого вала 1298-1467 мин<sup>-1</sup> и составляет 285 Нм при работе всех цилиндров, 219 – при работе трех цилиндров и 148 – при работе двух цилиндров.

Максимальное значение мощности ДВС составляет 57,8 кВт при работе четырех цилиндров в режиме свободного разгона и частоте вращения КВ 2140 мин<sup>-1</sup>, 33,4 кВт при работе трех цилиндров и

частоте вращения КВ 2004 мин<sup>-1</sup>, 22 кВт при работе двух цилиндров и частоте вращения КВ 1862 мин<sup>-1</sup>. При оценке мощности двигателя во время свободного разгона и поочередного отключения одного из цилиндров установлено, что эффективная мощность двигателя при работе трех цилиндров изменяется в интервале 33-34,3 кВт независимо от номера отключенного цилиндра, колебания мощности по цилиндрам не превышают 3,9%, что говорит высокой степени равномерности работы цилиндров.

Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при внедрении способа оперативного контроля мощности каждого цилиндра двигателя внутреннего сгорания в условиях эксплуатации.

### Библиографический список

1. Альт В.В., Савченко О.Ф., Елкин О.В. Цифровая технология оценки мощности тракторного парка сельхозпредприятия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №4. С. 25-31. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-25-31. EDN: ZUKOZU.

2. Иншаков А.П., Байков Д.В., Курбаков И.И., Голышев М.Е. Экспериментальное определение характеристик обкаточно-тормозного стенда для двигателей малогабаритной сельскохозяйственной техники в скоростных режимах холодной обкатки // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. №2. С. 63-71. EDN: NIZXJU.

3. Гайсин Э.М., Рожков А.С. Повышение эффективности работы дизельных двигателей при регулировании нагрузки отключением цилиндров // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2019. №2(118). С. 73-76. EDN: JWKCFТ.

4. Раков В.А., Литвинов В.И. Расчет мощности двигателя гибридной энергетической установки сельскохозяйственной машины // *АгроЗооТехника*. 2020. Т. 3. №1. С. 4.

5. Elkin O.V., Savchenko O.F. Automated assessment system of energy parameters of the tractor fleet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. N957(1). 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/957/1/012006.

6. Гребенников С.А., Гребенников А.С., Киселев Г.О. и др. Методология бестормозного диагностирования кривошипно-шатунного механизма ДВС // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. №3(42). С. 147-155. EDN: XВНУUI.

7. Гребенников А.С., Гребенников С.А., Косарева А.В., Трушкин И.Д. Диагностирование элементов трансмиссии автомобилей по рассогласованию мгновенных

угловых скоростей // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2021. №3(48). С. 121-127. EDN: VQLGHP.

8. Cai B., Sun X., Wang J., et al. Fault detection and diagnostic method of diesel engine by combining rule-based algorithm and Bns/BPNNs. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 57. 148-157. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.09.001.

9. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *Transactions on Industrial Electronics*. 2018. Vol. 65. N7. 5990-5998. DOI:10.1109/tie.2017.2774777.

10. Wang J., Wang Z., Stetsyuk V., et al. Exploiting Bayesian networks for fault isolation: A diagnostic case study of diesel fuel injection system. *ISA transactions*, 2019. Vol. 86. 276-286. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.10.044.

11. Zhang M., Zi Y., Niu L., et al. Intelligent diagnosis of v-type marine diesel engines based on multifeatures extracted from instantaneous crankshaft speed. *Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. N68(3). 722-740. DOI: 10.1109/TIM.2018.2857018.

12. Курносов А.Ф., Гуськов Ю.А., Корниенко В.Н., Галынский А.А. Изменение импульсно-силовой характеристики двигателя при работе с отключением цилиндров в режиме холостого хода // *Технический сервис машин*. 2022. Т. 60. №3(148). С. 21-33. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-3-21-33.

13. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Мотовилова М.В. Исследование эффективных показателей тракторного дизеля при работе на активированном топливе // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2019. №4(127). С. 179-186.

### References

1. Alt V.V., Savchenko O.F., Elkin O.V. Digital technology of assesment the power capacity of tractor fleet of an agricultural enterprise. *Agricultural machinery and technology*. 2019. Vol. 13. №4. 25-31 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-25-31. EDN: ZUKOZU.

2. Inshakov A.P., Baikov D.V., Kurbaков I.I., Golyshev M.E. Experimental determination of the characteristics of the roller brake tester for running of small-based engines of agricultural equipment in cold regimes. *Bulletin Samara state agricultural academy*. 2019. №2. 63-71 (In Russian). EDN: NIZXJU.

3. Gaisin E.M., Rozhkov A.S. Increasing operation efficiency of diesel engines at load regulated by cylinder deactivation. *Ènergosbereženie i vodopodgotovka*. 2019. №2(118). 73-76 (In Russian). EDN: JWKCFТ.

4. Rakov V.A., Litvinov V.I. Calculation of engine power of agricultural machine hybrid power plant. *AgroZooTekhnika*. 2020. Vol. 3. №1. 4 (In Russian).



5. Elkin O.V., Savchenko O.F. Automated assessment system of energy parameters of the tractor fleet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. N957(1). 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/957/1/012006.

6. Grebennikov A.S., Grebennikov S.A., Kiselev G.O., et al. Methodology of formless diagnosis of crank mechanism of internal combustion engine. *Technical regulation in transport construction*. 2020. N3(42). 147-155 (In Russian). EDN: XBHUUI.

7. Grebennikov S.A., Grebennikov A.S., Kosareva A.V., Trushkin I.D. Diagnostics of vehicle transmission elements by mismatch of instantaneous angular velocities. *Technical regulation in transport construction*. 2021. N3(48). 121-127. EDN: VQLGHP.

8. Cai B., Sun X., Wang J., et al. Fault detection and diagnostic method of diesel engine by combining rule-based algorithm and Bns/BPNNs. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 57. 148-157. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.09.001.

9. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *Transactions on Industrial Electronics*. 2018. Vol. 65. N7. 5990-5998. DOI:10.1109/tie.2017.2774777.

10. Wang J., Wang Z., Stetsyuk V., et al. Exploiting Bayesian networks for fault isolation: A diagnostic case study of diesel fuel injection system. *ISA transactions*, 2019. Vol. 86. 276-286. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.10.044.

11. Zhang M., Zi Y., Niu L., et al. Intelligent diagnosis of v-type marine diesel engines based on multifeatures extracted from instantaneous crankshaft speed. *Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. N68(3). 722-740. DOI: 10.1109/TIM.2018.2857018.

12. Kurnosov A.F., Guskov Yu.A., Kornienko V.N., Galynsky A.A. Change in the pulse-power characteristics of the engine working with the cylinder disconnecting in idle mode. *Technical service of machines*. 2022. Vol. 60. N3(148). 21-33. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-3-21-33.

13. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Motovilova M.V. Research of effective indicators of tractor diesel at work on the activated fuel. *Proceedings of R.E. Alekseev NSTU*. 2019. N4(127). 179-186 (In Russian).

#### **Заявленный вклад соавторов**

Курносов А.Ф. – научное руководство, разработка теоретических предпосылок, методики исследований, получение экспериментальных данных, обработка и анализ информации, написание основных разделов статьи;

Гуськов Ю.А. – разработка методики исследований, анализ литературы,

формулирование цели исследования и основных выводов, разработка программы исследований, получение экспериментальных данных, обработка и анализ информации.

Долгушин А.А. – разработка теоретических предпосылок и программы исследований, получение экспериментальных данных, обработка и анализ информации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

Kurnosov A.F. – scientific management, development of theoretical background, research methodology, obtaining experimental data, processing and analysis of information, writing the main sections of the manuscript;

Guskov Yu.A. – development of research methodology, literature analysis, formulation of the research goal and main conclusions, development of the research program, obtaining experimental data, processing and analysis of information.

Dolgushin A.A. – development of theoretical assumptions and research program, obtaining experimental data, processing and analysis of information.

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 11.12.2023**

**Статья принята к публикации 09.01.2024**

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ-55111



*Александр Геннадиевич Пастухов, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: pastukhov\_ag@mail.ru;*

*Евгений Петрович Тимашов, доктор технических наук, доцент  
Вадим Игоревич Вергун, аспирант*

*Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина,  
г. Белгород, Российская Федерация*

**Реферат.** В работе представили тенденции развития систем автоматической диагностики узлов механических трансмиссий. (Цель исследования) Обосновать технологию автоматического диагностирования для выявления предотказного состояния узлов трансмиссии. (Материалы и методы) Выбрали материалом исследования опорные узлы трансмиссии автомобиля КамАЗ-55111 с подшипниками качения 50412 и 53610. Использовали анализ существующих методов трудоемкости, методы расчета деталей машин, справочную информацию по подшипникам, конечно-элементный анализ температурных полей и регрессионный анализ. (Результаты и обсуждение) Описали характеристики показателей опорных узлов трансмиссии (подшипников качения), рассмотрели методы их диагностирования. Выполнили расчет сил, действующих на подшипники на вторичном и промежуточном валах автомобиля КамАЗ-55111. Использовали для расчета температуры в зоне трения конструктивные, технологические и эксплуатационные параметры. В целях совершенствования технологии диагностирования провели моделирование температурных полей с помощью приложения АРМ FEM САПР Компас 3D. Разработали устройство для автоматического измерения температуры в зоне трения и датчик для измерения температуры. (Выводы) На надежность опорных узлов трансмиссии сельскохозяйственной техники влияют условия работы. Установили, что наиболее эффективным методом диагностирования по трудоемкости трансмиссии служит метод термодиагностики. Анализ температуры в зоне трения подшипников 50412 и 53610 с первой по четвертую передачу показал снижение температуры. Исследование карт температурных полей позволило установить взаимосвязь между температурами в зоне трения и в зоне контроля подшипников 50412 и 53610. Разработан и апробирован регистратор для автоматического контроля технического состояния узлов.

**Ключевые слова:** надежность, трансмиссия, подшипник, опорные узлы, диагностирование, датчик температуры, условия работы подшипников.

**Для цитирования:** Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Вергун В.И. Совершенствование технологии диагностирования опорных узлов трансмиссии автомобиля КамАЗ-55111 // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 21-27. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-21-27. EDN: AMDWLP.

Scientific article

## IMPROVEMENT OF DIAGNOSTICS OF VEHICLE TRANSMISSION SUPPORT UNITS KAMAZ-55111

*Aleksandr G. Pastukhov, Dr.Sc.(Eng), professor;  
Evgeniy P. Timashov, Dr.Sc.(Eng), leading researcher;  
Vadim I. Vergun, postgraduate*

*Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod, Russian Federation*

**Abstract.** The paper presents trends in the development of automatic diagnostics systems for mechanical transmission units. (Research purpose) The research purpose is substantiating the technology of automatic

identifying the pre-failure condition of transmission units. (Materials and methods) The supporting components of the KamAZ-55111 transmission with rolling bearings 50412 and 53610 were chosen as the research material. The analysis of existing methods of labor intensity, methods for calculating machine parts, reference information on bearings, finite element analysis of temperature fields and regression analysis were used. (Results and discussion) The characteristics of the indicators of the transmission support units (rolling bearings) were described, methods of their diagnosis were considered. The forces acting on the bearings on the secondary and intermediate shafts of the KamAZ-55111 car were calculated. The design, technological and operational parameters were used to calculate the temperature in the friction zone. In order to improve the diagnostic technology, temperature fields were simulated using the APM FEM CAD Compass 3D application. A device for automatic temperature measurement in the friction zone and a sensor for temperature measurement have been developed. (Conclusions) The reliability of the transmission support units of agricultural machinery is affected by the working conditions. It was established that the most effective method of diagnosing the complexity of the transmission is the method of thermodiagnosics. Analysis of the temperature in the friction zone of bearings 50412 and 53610 from first to fourth gear showed a decrease in temperature. The study of temperature field maps made it possible to establish the relationship between the temperatures in the friction zone and in the control zone of bearings 50412 and 53610. A recorder for automatic monitoring of the technical condition of the nodes has been developed and tested.

**Keywords:** reliability, transmission, bearing, support units, diagnostics, temperature sensor, bearing operating conditions.

**For citation:** Pastukhov A.G., Timashov E.P., Vergun V.I. Improvement of diagnostics of vehicle transmission support units KamAZ-55111. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. NI(154). 21-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-21-27. EDN: AMDWLP

Существует острая необходимость в обеспечении надежности сельскохозяйственной техники на основе стратегий технического обслуживания и ремонта, ориентированных на надежность. Особое значение в этом отношении имеет техническая диагностика. Она определяет организационные меры технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники [1].

Современный уровень развития технологий свидетельствует об эффективности разработки и применения систем автоматической диагностики для бортового использования [2].

Применение автоматической диагностики поможет снизить трудоемкость и уменьшить затраты на оплату труда.

**Цель исследования** – обосновать технологию автоматического диагностирования для выявления предотказного состояния опорных узлов.

**Материалы и методы.** Материалом исследования стали опорные узлы трансмиссии автомобиля КамАЗ-55111 с подшипниками качения 50412 и 53610. Для выбора эффективного метода диагностирования использовали сравнение по трудоемкости. При расчете сил и реакций применили методы расчета деталей машин. Проведение моделирования температурных полей основывалось на конечно-элементном анализе. Для расчета коэф-

фициента пропорциональности конечно-элементной модели использовали регрессионный анализ.

**Результаты и обсуждение.** Уже на первом этапе производства сельскохозяйственной техники разработчики закладывают определенный ресурс и срок службы в узлы и агрегаты автомобиля. В ходе эксплуатации машин их системы, узлы и агрегаты могут находиться в исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном состояниях. Это обусловлено множеством факторов. Один из самых важных факторов – надежность узлов. Анализируя информацию по отказам сельскохозяйственных автомобилей, можно сделать вывод, что высокий процент приходится на отказы двигателя – 42%; трансмиссии – 24; подвески – 18 и электрооборудования – 5% [3].

Исходя из этого четверть всех отказов приходится на агрегаты трансмиссии сельскохозяйственной техники. В большинстве случаев отказ в работе узла трансмиссии связан с потерей жесткости в опорах качения, так как увеличивается радиальный зазор в подшипнике и нарушается плотность его посадки на вал [4].

Для своевременного обнаружения неисправностей и предупреждения отказов агрегатов трансмиссии применяют разнообразные методы диагностирования: метрический (только в неработа-

ющем состоянии); виброакустический; термодиагностический [5, 6].

Анализ регламента технического обслуживания показал, что общая трудоемкость метрического метода составляет 3,56 чел.-час, виброакустического метода – 0,87 чел.-час; термодиагностического метода – 0,58 чел.-час. Существенным преимуществом термодиагностического метода диагностики служит его высокая приспособленность к автоматизации. Применение датчиков температуры в комплексе с запрограммированными микроконтроллерами позволит полностью автоматизировать диагностирование узлов [7].

Для выявления температуры в зоне трения подшипников, необходимо провести расчет сил, действующих на подшипники на вторичном и промежуточном валах автомобиля КамАЗ-55111.

При расчете сил использовали величины делительных диаметров зубчатых колес с первой по четвертую передачу на вторичном валу ( $d_1 = 263$  мм;  $d_2 = 224$ ;  $d_3 = 250$ ;  $d_4 = 200$  мм). Проведя расчет вторичного вала, получаем, что на первой передаче окружная сила будет равна  $F_{t1} = 34965$  Н, а радиальная сила –  $F_{r1} = 12727$  Н. В итоге общая сила на первой передаче будет равна  $F_1 = 37209$  Н. Для второй–четвертой передач проводим аналогичные расчеты. Если говорить о пятой передаче, то она прямая и нагрузка на этой передаче небольшая, поэтому и температура будет ниже, чем у остальных передач. В итоге получаем, что  $F_2 = 22508$  Н;  $F_3 = 12514$ ;  $F_4 = 9577$  Н. Анализируя результаты можно сказать, что нагрузка с первой по четвертую передачу понижается [8].

Далее проводим расчет сил промежуточного вала. С первой по четвертую передачу окружные силы на промежуточном валу будут равны силам на вторичном валу, так как его зубчатые колеса находятся в зацеплении с соответствующими зубчатыми колесами вторичного вала.

В результате получаем, что общая сила с первой по четвертую передачу на промежуточном валу будет равна:  $F_1 = 37209$  Н;  $F_2 = 22508$ ;  $F_3 = 12514$ ;  $F_4 = 9577$  Н. Анализируя результаты можно сказать, что нагрузка с первой по четвертую передачу понижается также, как и на вторичном валу.

Реакция подшипниковой опоры заднего подшипника вторичного вала для передач с первой по четвертую будет равна:  $R_1 = 33879$  Н;  $R_2 = 13940$ ;  $R_3 = 4245$ ;  $R_4 = 2446$  Н. Реакция подшипниковой опоры заднего подшипника промежуточного вала для передач с первой по четвертую будет равна:  $R_1 = 33731$  Н;  $R_2 = 14404$ ;  $R_3 = 4799$ ;  $R_4 = 2938$  Н.

Таким образом, проведенные расчеты сил, действующих на подшипники на вторичном и промежуточном валах, помогут выявить температуру в зоне трения подшипников на автомобиле КамАЗ 55111.

Для расчета температуры в зоне трения будем использовать конструктивные, технологические и эксплуатационные параметры. Представим подшипники качения 50412 и 53610 в виде условного подшипника скольжения. Исходные данные подшипников 50412 и 53610 представлены в таблице.

Проведенные ранее расчеты сил, действующих на подшипники на вторичном и промежуточном валах, учитывали для определения температуры в зоне трения подшипников. Для чего были использованы угловые скорости и крутящие моменты

Table	Таблица
Исходные данные подшипников 50412 и 53610	
Parameters of bearings 50412 and 53610	
Параметры	Значение параметров
Подшипник 50412	
Внутренний диаметр, мм	60
Наружный диаметр, мм	150
Ширина, мм	35
Масса, кг	2,8
Количество шариков, шт	7
Диаметр шарика, мм	28,58
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	4800
Грузоподъемность динамическая, кН	108
Грузоподъемность статическая, кН	70
Подшипник 53610	
Внутренний диаметр, мм	50
Наружный диаметр, мм	110
Ширина, мм	40
Масса, кг	1,9
Количество роликов, шт	28
Размеры ролика, мм	15x14,94
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	4300
Грузоподъемность динамическая, кН	176
Грузоподъемность статическая, кН	120

ты валов с первой по четвертую передачу. Угловую скорость и крутящий момент на пятой передаче не учитывали, так как нагрузка будет небольшая и, соответственно, температура будет незначительной.

Угловые скорости на вторичном валу будут равны:  $\omega_1 = 34,8$  с<sup>-1</sup>;  $\omega_2 = 67,5$ ;  $\omega_3 = 108,8$ ;  $\omega_4 = 177,9$  с<sup>-1</sup>. На промежуточном валу угловая скорость постоянна и равна  $\omega = 56,21$  с<sup>-1</sup>.

Для расчета температуры в зоне трения ради-



альных подшипников использовали аналитическую модель [9]:

$$\theta_F^{\text{пр}} = \frac{\delta f F \omega}{2hI(\lambda\sqrt{\frac{2\alpha(h+\pi r)}{\lambda h \pi r}} + k' \rho c \times 2,6\sqrt{\frac{a\omega r}{\lambda_d}})},$$

где –  $\delta$  коэффициент распределения теплоты между трущимися телами;  $f$  – коэффициент трения;  $F$  – нагрузка на подшипник, Н;  $\omega$  – угловая скорость,  $c^{-1}$ ;  $h$  – длина шипа, м;  $I$  – механический эквивалент теплоты;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\pi$  – математическая константа;  $r$  – радиус шипа, м;  $k'$  – коэффициент пропорциональности;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_d$  – длина волны неровностей на трущейся поверхности, м.

Результаты расчета температур в зоне трения подшипников 50412 и 53610 показали на рисунке 1.

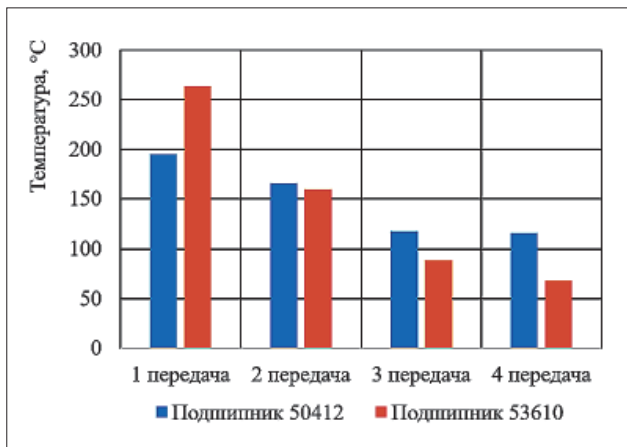


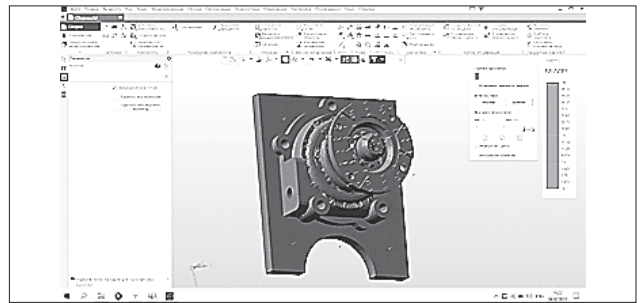
Рис. 1. Результаты расчета температур в зоне трения подшипников 50412 и 53610

Fig. 1. Calculated temperatures in the friction zone of bearings 50412 and 53610

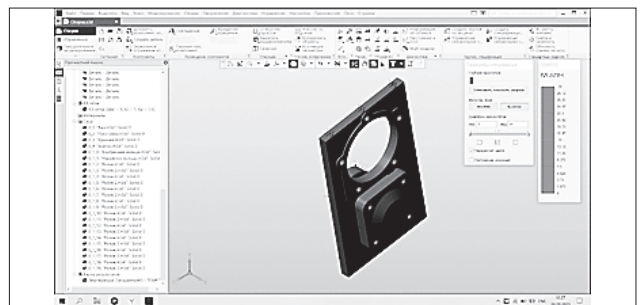
Результаты расчета температуры в зоне трения показали, что температура в зоне трения подшипников 50412 и 53610 с первой по четвертую передачу понижается. На первой передаче температура подшипника 50412 равна 195,11 °С, а на подшипнике 53610 – 263,93 °С, такие большие значения температур связаны с большими нагрузками на первой передаче. На четвертой передаче температура подшипника 50412 равна 116,33 °С, а на подшипнике 53610 – 67,93 °С.

Для совершенствования технологии диагностирования провели тепловой анализ с помощью специального приложения *APM FEM*, входящего в состав *Компас 3D*. Получили карту температурных полей в заданном диапазоне. Карту темпера-

турного поля подшипника 50412 в диапазоне 0-30 °С представили на рисунке 2, а. Для подшипника 53610 диапазоны варьируются аналогично. Карту температурного поля этого подшипника в диапазоне 0-30 °С представили на рисунке 2, б.



а



б

Рис. 2. Карта температурных полей: а – подшипник 50412; б – подшипник 53610

Fig. 2. Temperature field map: а – bearing 50412; б – bearing 53610

Проанализировав карты полей температурного поля подшипника 50412, можно сделать вывод, что при всех режимах нагружения наблюдается рабочая температура. Это означает, что подшипниковый узел имеет хорошую теплопроводность, которая позволяет ему выдерживать высокие нагрузки.

Изучив карты полей температурного поля подшипника 53610, определили, что при всех режимах нагружения наблюдается рабочая температура. Как и подшипник 50412, он также имеет хорошую теплопроводность, которая позволяет ему выдерживать высокие нагрузки.

На графике представили расчет коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели, связывающей температуру в зоне трения и в зоне контроля (диагностическая температура) (рис. 3).

В результате расчета выяснили взаимосвязь между температурой в зоне трения и в зоне контроля подшипников 50412 и 53610.

Для подшипника 50412 коэффициент равен  $k_1 = 0,5624$ , а для подшипника 53610 –  $k_2 = 0,1933$ .



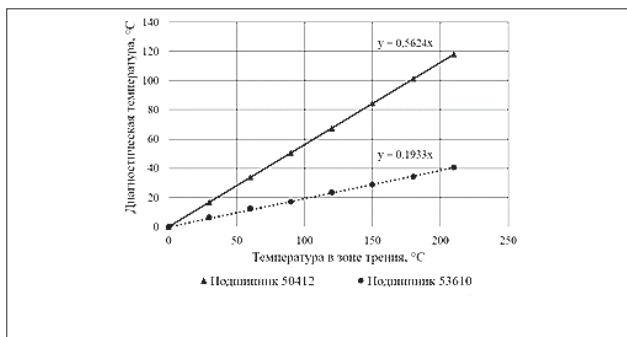


Рис. 3. График расчета коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели

Fig. 3. Calculation of the proportionality coefficient of the finite element model

Разработали устройство для автоматического измерения температуры в зоне трения на основе диагностической температуры, измеренной в зоне, предназначенной для диагностирования и коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели с последующим сравнением величины температуры в зоне трения с предельно допустимой температурой [10].

Алгоритм работы регистратора заключается в следующем. Цифровой сигнал измеряемой температуры  $\Theta$  контролируемого элемента трансмиссии записывается через равные промежутки времени. Через значение временного интервала из разницы последующей  $\Theta_1$  и предыдущей температуры  $\Theta$  вычисляется величина скорости изменения температуры  $V_t$ .

Полученное значение температуры  $\Theta$  сравнивается со значением предельной температуры  $\Theta_L$ , а значение скорости изменения температуры  $V_t$  сравнивается со значением предельной скорости изменения температуры  $V_L$ . В случае, если хотя бы одно из значений превышено, регистратор срабатывает и выдает световой и звуковой сигналы.

В целях автоматического диагностирования разработали датчик для измерения температуры, который представили на рисунке 4. Уже существующие диагностические системы с датчиками температуры применимы либо исключительно для подшипников скольжения, либо не обеспечивают эффективной установки в корпусе подшипника качения [11, 12].

Разработанная конструкция датчика для измерения температуры обеспечивает его надежное крепление на корпусе подшипникового узла. Для этого на корпусе в месте, определенном на основе анализа карт температурных полей, выполняют глухое резьбовое отверстие.

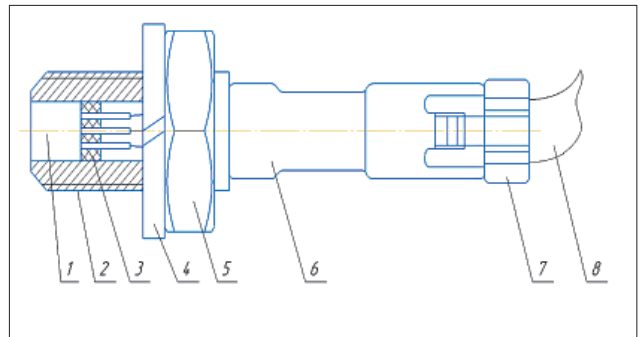


Рис. 4. Датчик для измерения температуры: 1 – датчик; 2 – корпус; 3 – уплотнительное кольцо; 4 – шайба; 5 – гайка; 6 – гнездо JST-03; 7 – штекер JST-03; 8 – кабель

Fig. 4. Sensor for temperature measurement: 1 – sensor; 2 – housing; 3 – sealing ring; 4 – washer; 5 – nut; 6 – socket JST-03; 7 – plug JST-03; 8 – cable

С целью повышения точности измерения температуры перед монтажом датчика отверстие частично заполняют термопастой.

**Выводы.** На надежность опорных узлов трансмиссии сельскохозяйственной техники основное влияние оказывают условия работы. Установили, что наиболее эффективным методом диагностирования по трудоемкости трансмиссии служит метод термодиагностики. Общая трудоемкость термодиагностического метода – 0,57 чел.-час. В ходе анализа результатов определили, что температура в зоне трения подшипников 50412 и 53610 с первой по четвертую передачу понижается.

Выявили взаимосвязь между температурой внутри и снаружи подшипников 50412 и 53610. Для подшипника 50412 коэффициент равен  $k_1 = 0,5624$ , а для подшипника 53610 коэффициент равен  $k_2 = 0,1933$ . Разработали конструкцию датчика для измерения температуры подшипниковых узлов.

### Библиографический список

1. Симон Д.В. Эксплуатационные методы повышения надежности сельскохозяйственной техники // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. N4(83). С. 130-136. <https://doi.org/10.12737/16070>.
2. Костомахин М.Н., Воронов А.Н., Курбанов Р.К. Способ дистанционного мониторинга надежности сельскохозяйственной техники с использованием систем GPS/ГЛОНАСС // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 132. С. 56-63. EDN: YNKKDB.
3. Иванчиков Ю.В., Сквородин В.Я., Доброхотов Ю.Н. Исследование механизма изнашивания подшипниковых посадок автотракторных трансмиссий // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. N4(60). С. 71-79. DOI:

0.12737/2073-0462-2021-71-79.

4. Иванищников Ю.В., Сквородин В.Я., Доброхотов Ю.Н. Исследование функциональной связи конструктивных и рабочих параметров подшипникового узла // Вестник Чувашской сельскохозяйственной академии. 2020. N1(12). С. 91-98. DOI: 10.17022/6fya-1p90.

5. Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Саяпин А.С. Система дистанционного контроля технического состояния на примере коробки перемены передач трактора «Кировец» // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. N3. С. 22-27. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-22-27.

6. Федоренко В.Ф., Таркивский В.Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. N1. С. 10-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15.

7. Горлов И.В. Комплексная диагностика как основа прогнозирования технического состояния торфяной машины // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. N2(2). С. 61-68. EDN: HYFHJC.

8. Тишкин Л.В., Ильин М.А., Ильин П.А. Теоретические исследования рабочей температуры подшипника дисковой бороны // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2011. N24. С. 307-311.

9. Тимашов Е.П., Вергун В.И. Алгоритм верификации аналитических моделей температуры в зоне трения подшипниковых узлов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. N4(36). С. 69-73. EDN: WBOYTB.

10. Пастухов А.Г., Тимашов Е.П. Диагностирование опорных узлов трансмиссии на основе изучения термонагруженности // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17. N2. С. 61-68. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-61-68.

11. Самойленко А.Ю., Туркин В.А. Системы мониторинга температуры подшипников судовых дизелей // Эксплуатация морского транспорта. 2019. N4(93). С. 72-80. DOI: 10.34046/aumsuomt93/13.

12. Костомахин М.Н., Саяпин А.С., Пестряков Е.В., Петрищев Н.А. Совершенствование средств диагностирования как фактор повышения ресурсосбережения при эксплуатации сельскохозяйственной техники // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2023. N1(22). С. 103-111. EDN: DLWGGI.

## References

1. Simon D.V. Functional techniques for increasing reliability of agricultural machinery. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2015. N4(83). 130-136 (In Russian). <https://doi.org/10.12737/16070>.

2. Kostomahin M.N., Voronov A.N., Kurbanov R.K. Method of remote monitoring reliability of agricultural machinery using GPS/GLONASS systems. *Proceedings of GOSNITI*. 2018. Vol. 132. 56-63 (In Russian) EDN: YNKKDB.

3. Ivanshchikov Yu.V., Skovorodin V.Ya., Dobrohotov Yu.N. Research of the wear mechanism of bearing seats of automotor-tractor transmissions. *Vestnik of the Kazan state agrarian university. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. Vol. 15. N4(60). 71-79 (In Russian). DOI: 10.12737/2073-0462-2021-71-79.

4. Ivanshchikov Yu.V., Skovorodin V.Ya., Dobrohotov Yu.N. Study of functional communication of constructive and operating parameters of a bearing unit. *Bulletin of the Chuvash Agricultural Academy*. 2020. N1(12). 91-98 (In Russian). DOI: 10.17022/6fya-1p90.

5. Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Sayapin A.S. A system for the remote monitoring of vehicle technical condition: kirovets tractor gearbox case study. *Agricultural machinery and technology*. 2021. Vol. 15. N3. 22-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-22-27.

6. Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E. Digital wireless technology to measure agricultural performance. *Agricultural machinery and technology*. 2020. Vol. 14. N1. 10-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15.

7. Gorlov I.V. Complex diagnostics as a basis for forecasting the technical condition of the peat machine. *Bulletin of Tver state technical university. Series: Technical Sciences*. 2019. N2(2). 61-68 (In Russian). EDN: HYFHJC.

8. Tishkin L.V., Ilyin M.A., Ilyin P.A. Theoretical studies of the operating temperature of a disc harrow bearing. *Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2011. N24. 307-311 (In Russian).

9. Timashov E.P., Vergun V.I. Verification algorithm of analytical models of temperature in friction zone of bearing units. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*. 2022. N4(36). 69-73 (In Russian). EDN: WBOYTB.

10. Pastukhov A.G., Timashov E.P. Diagnostics of transmission bearing units based on thermal load study. *Agricultural machinery and technology*. 2023. Vol. 17. N2. 61-68 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-61-68.

11. Samoilenko A.Yu., Turkin V.A. The temperature control system of bearings of ship diesel. *Operation of marine transport*. 2019. N4(93). 72-80 (In Russian). DOI: 10.34046/aumsuomt93/13.

12. Kostomakhin M.N., Sayapin A.S., Pestryakov Ye.V., Petrishchev N.A. Improving diagnostic tools as a factor in increasing resource saving in the operation of agricultural machinery. *Design, use and reliability of agricultural*

---

*machinery. 2023. N1(22). 103-111 (In Russian). EDN: DLWGGI.*

**Заявленный вклад соавторов**

*Пастухов А.Г. – научное руководство, поставка задач, раскрытие идеи;*

*Тимашов Е.П. – научное руководство, проработка идеи, анализ и доработка текста;*

*Вергун В.И. – подготовка и анализ данных, формирование текста.*

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Contributions of the coauthors**

*Pastukhov A.G. – scientific leadership, task delivery, idea disclosure;*

*Timashov E.P. – scientific leadership, elaboration of the idea, analysis and revision of the manuscript;*

*Vergun V.I. – data preparation and analysis, writing the manuscript.*

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 01.12.2023**

**Статья принята к публикации 14.01.2024**

## РЕСУРСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМЕ УСЛУГ СЕРВИСНОЙ КАСТОМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН



*Надежда Савельевна Севрюгина, доктор технических наук, доцент,  
e-mail: sevruginans@rgau-msha.ru;*

*Александр Юрьевич Фомин, кандидат технических наук, доцент;  
Максим Дмитриевич Рысев, магистрант  
Алексей Юрьевич Шугаев, магистрант*

*РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация*

*Данные исследования проводились в рамках Тематического плана выполнения научно-исследовательских работ Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева по заказу Минсельхоза России за счет бюджетных средств в 2023 году.*

**Реферат.** *Транспортно-технологические средства, эксплуатируемые в условиях выполнения разно-сторонних задач агропромышленного комплекса, работают в постоянно меняющихся дорожных условиях. Данные факторы создают проблемы для стабильной работы всех систем машины, что в целом требует корректировки стратегии оценки их остаточного ресурса. Конструкторы транспортно-технологических машин предлагают новые модели, оборудованные системами безопасности, с заданной надежностью по критерию критичности. Подобные системы оснащаются защитными устройствами, способными выдерживать ограниченное количество допустимых внешних нагрузок. (Цель исследования) Обосновать индивидуализацию архитектуры конструктивной кастомизации технологических машин, эксплуатируемых в сфере агропромышленного комплекса, на площадках сервисных организаций, прошедших реинжиниринг производственно-технической инфраструктуры. (Материалы и методы) Рассмотрели пути совершенствования сельскохозяйственных машин производителями для повышения их конкурентоспособности. Выделили проблему замены машин, исчерпавших срок службы на новые, конструктивно усовершенствованные. В доказательной форме показали, что часть компонентов имеет остаточный ресурс и способность продолжать эффективно функционировать. (Результаты и обсуждение) Предложили использовать ресурсные резервы машин путем обоснования продления их срока службы. Дали рекомендации для эксплуатантов по индивидуализации архитектуры конструктивной кастомизации технологических машин, эксплуатируемых в сфере агропромышленного комплекса. Инновационные технологические процессы модернизации машин предлагается внедрить в организационную структуру сервисных организаций путем проведения реинжиниринга производственно-технической инфраструктуры. Рекомендовали при оценке уровня технического совершенства машин выполнять сопоставление временных периодов технического прогресса. В качестве примера выполнили модальный анализ ходовой части технологических машин. (Выводы) Обосновали ресурсосберегающий эффект внедрения методики реинжиниринга сервисной организации с включением модели кастомизации сельскохозяйственных машин с обоснованием периода продления срока службы.*

**Ключевые слова:** *надежность, отказы, ресурс, восстановление, кастомизация, технологические машины, конкурентоспособность, эксплуатация.*

**Для цитирования:** *Севрюгина Н.С., Фомин А.Ю., Рысев М.Д., Шугаев А.Ю. Ресурсбережение в системе услуг сервисной кастомизации транспортно-технологических машин // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 28-35. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-28-35. EDN: JHSQHZ.*



**RESOURCE SAVING IN THE SERVICE CUSTOMIZATION OF TRANSPORT  
AND TECHNOLOGICAL MACHINES**

*Nadezhda S. Sevryugina, Dr.Sc.(Eng.), associate professor;  
Aleksandr Yu. Fomin, Ph.D.(Eng.), associate professor;  
Maksim D. Rysev, master's student  
Aleksy Yu. Shugaev, master's student  
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy, Moscow, Russian*

*These studies were conducted within the framework of the Thematic Plan for the implementation of research work of the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev commissioned by the Ministry of Agriculture of Russia at the expense of budgetary funds in 2023.*

**Abstract.** *Transport and technological facilities operated in conditions of fulfilling the versatile tasks of the agro-industrial complex operate in constantly changing road conditions. These factors create problems for the stable operation of all machine systems, which generally requires adjusting the strategy for assessing their residual resource. Designers of transport and technological machines offer new models equipped with security systems, with a given reliability according to the criterion of criticality. Such systems are equipped with protective devices capable of withstanding a limited number of permissible external loads. (Research purpose) The research purpose is substantiating the individualization of the architecture of constructive customization of technological machines operated in the agro-industrial complex at the sites of service organizations that have undergone reengineering of production and technical infrastructure. (Materials and methods) Considered ways to improve agricultural machinery by manufacturers to increase their competitiveness. The problem of replacing machines that have exhausted their service life with new, structurally improved ones was highlighted. In an evidentiary form, it was shown that some of the components have a residual resource and the ability to continue to function effectively. (Results and discussion) It was proposed to use the resource reserves of the machines by justifying the extension of their service life. Recommendations were made for operators on the individualization of the architecture of constructive customization of technological machines operated in the agro-industrial complex. It is proposed to introduce innovative technological processes of machine modernization into the organizational structure of service organizations by reengineering the production and technical infrastructure. It was recommended to compare the time periods of technological progress when assessing the level of technical perfection of machines. As an example, a modal analysis of the undercarriage of technological machines was performed. (Conclusions) The resource-saving effect of the introduction of the service organization's reengineering methodology with the inclusion of a model of customization of agricultural machinery with the justification of the service life extension period was substantiated.*

**Keywords:** *reliability, failures, resource, restoration, customization, technological machines, competitiveness, exploitation.*

**For citation:** *Sevryugina N.S., Fomin A.Yu., Rysev M.D., Shugaev A.Yu. Resource saving in the service customization of transport and technological machines. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 28-35 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-28-35. EDN: JHSQHZ.*

**З**адача развития агропромышленного комплекса (АПК) в качестве приоритетной в программах стратегического развития страны включает перечень мероприятий по внедрению инновационных технологий. В свою очередь, эффективность внедрения новых технологий зависит от

соответствующего технического сопровождения машин и оборудования, конструкция которых также должна отвечать современным требованиям.

Экономическая составляющая данного подхода не позволяет широко использовать новые технические средства, а имеющиеся в производствен-

ном секторе АПК машины и оборудование зачастую конструктивно морально и физически устаревшие. На государственном уровне эта проблема получает решение при реализации программы «Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России до 2030 года».

Транспортно-технологические средства, эксплуатируемые в условиях выполнения разносторонних задач АПК, работают в постоянно меняющихся дорожных условиях. Данные факторы создают проблемы для стабильной работы всех систем машины, что в целом требует корректировки стратегии оценки их остаточного ресурса. Конструкторы транспортно-технологических машин предлагают новые модели, оборудованные системами безопасности, с заданной надежностью по критерию критичности. Подобные системы оснащаются защитными устройствами, способными выдерживать ограниченное количество допустимых внешних нагрузок [1].

В качестве результатов инновационного развития сельской машиностроительной сферы можно представить технологические решения заводоизготовителей, в частности [2]:

- Владимирский моторо-тракторный завод (ВМТЗ) совершенствует дизайн техники, ведет разработки в сфере увеличения мощности и экологичности двигателей внутреннего сгорания для тракторов Т-50 и Т-85, эффективность работы трансмиссии и тормозной системы, работает над внедрением новаций в области конструкции узлов и агрегатов;

- ЗАО «АгроТехМаш» (АТМ) решает проблему импортозамещения путем разработки собственных конструкций агрегатов и комплектующих для новых машин: тракторы АТМ 7360, АТМ 7400. Аналогичные работы проводятся и на Петербургском тракторном заводе (ПетТЗ) при выпуске тракторов новой серии К-9000; «Алттрак» (АТЗ) – выпуск многоцелевых гусеничных тракторов Т-5.01, А-600 (на базе трактора Т-250); Агромашхолдинг – скоростной гусеничный трактор ЧЕТРА 6СТ 315;

- ОАО «Липецкий трактор» (ЛТЗ) работает над повышением энергонасыщенности тракторов. Среди новаций можно выделить разработку интегрального трактора ЛТЗ-155, что в дальнейшем предполагает цепочку реорганизации систем сервиса и методик оценки ресурсных показателей, так как до настоящего времени такие технологии не применялись.

Подобный путь интенсификации производства используют ВгТЗ – Волгоградский тракторный завод и УВЗ – Уралвагонзавод, расширяя номенклатуру сменного оборудования с оппозитным приводом за счет включения интегральной схемы ком-

поновки. Тенденция производителей к конструированию техники по принципу комбинирования агрегатов, т. е. модульная компоновка по функциональному признаку взаимозаменяемости, расширяет перспективы получения индивидуальной модели по заявке потребителя [3].

Учитывая высокую затратность приобретения новой техники, большая часть предприятий АПК берет необходимую технику в лизинг. Так, Агрохолдинг предлагает машины на срок до 7 лет, но в этом случае удорожание техники составляет 3% и более ежегодно. В то же время не следует забывать об имеющихся ресурсных резервах у находящихся в обращении АПК транспортно-технологических машин со сроком службы от 3, 5, 7, 10 и более лет, продолжающих функционировать с условно достаточной эффективностью [4].

При всей значимости задач технического обеспечения АПК вопрос о содержании этой техники, контроля технического состояния, корректировки сроков службы и повышения ресурсных потенциалов не получил должного внимания.

Недостаточность методического и научно-обоснованного сопровождения требует глубокой проработки смежных сфер обеспечения, таких как сервисные организации. Представляется, что решение данной проблемы лежит в плоскости широкой модернизации технических средств АПК, в частности, внедрение механизма кастомизации в сервисных организациях. В свою очередь, в сервисных организациях требуется провести реинжиниринг с модернизацией производственно-технической инфраструктуры [5].

**Цель исследования** – обосновать индивидуализацию архитектуры конструктивной кастомизации технологических машин, эксплуатируемых в сфере АПК, на площадках сервисных организаций, прошедших реинжиниринг производственно-технической инфраструктуры.

**Материалы и методы.** Транспортно-технологические средства, эксплуатируемые в условиях выполнения разносторонних задач АПК, работают в постоянно меняющихся дорожных условиях. Данные факторы создают проблемы для стабильной работы всех систем машины, что в целом требует корректировки стратегии сервисного обслуживания. Теоретически доказано, что сложно структурированные системы подвержены конкурирующим, но зависимым режимам отказа в результате деградации и нагрузок, обусловленных факторным влиянием, таким, как усталость, износ, трещины, перегрузки и вибрационные нагрузки. По-

скольким данным процессам отказов конкурируют друг с другом, вызывая цепочку отказов в системах машины, которая характеризуется как зависимые отказы, то в теории данные явления получили название «множественные зависимые конкурирующие процессы отказы» (*MDCFPs*). Исследования проводятся в двух областях: по анализу надежности и разработке оптимальной программы обслуживания [6].

Рассмотрение множественных зависимых конкурирующих процессов отказа сложных систем проводится в тесной связи с их рабочими средами; модели случайных процессов используются для описания характеристик изменений факторов влияния в динамических средах сложно-структурированных систем; модели Марковских цепей используются для оценки процессов с конечным состоянием при эволюционном развитии сред в заданных производственных системах по критерию их производительности. В настоящее время получила широкое распространение модель *N*-критического нагружения, сущность которой заключается в установлении количественной характеристики пиковой нагрузки, в частности, заключительного цикла нагружений, критичность которого провоцирует отказ в системе.

Факторная неопределенность и критериальная вариативность среды функционирования может сделать непрактичным или даже невозможным получение достоверных параметров о состоянии системы.

Требуется обоснования подбор базовых допущений и сервисной стратегии для систем *MDCFPs*, подверженных динамическим нагрузкам и *N*-критическому нагружению. Далее требуется вывести функцию надежности системы с введением алгоритма моделирования для вычисления функции надежности, что в целом позволит разработать модель оптимизации, основанной на стратегии профилактического обслуживания [7].

Повышение качества сервисных услуг поддержания работоспособного состояния технологических машин служит постоянной задачей для всех предприятий, оказывающих данные услуги.

Проведение мероприятий по совершенствованию деятельности сервисных предприятий обеспечивает повышение качества услуг только на 5-20%, что не позволяет интенсифицировать внедрение инновационных технологий в сервисной сфере.

Как отмечалось выше, в секторах АПК задерживается техника, имеющая срок службы от 3, 5, 7, 10 и более лет, и если рассматривать конструктивную составляющую с учетом инновационного технологического развития, то ряд компонентов

становится не столько физически устаревшим, сколько морально и функционально не совершенным. Аналитические исследования показывают, что система реинжиниринга для сервисных организаций в первую очередь базируется на введении цифрового сопровождения выполнения технологических операций и контроля качества и технического состояния машин в режиме реального времени [8]. Предлагается применить процессный подход управления сервисными услугами, реинжиниринг, новым направлением которого служит кастомизация технологических машин. Внедрение механизма кастомизации в систему сервисного обслуживания и ремонта технологических машин дает возможность провести модернизацию технологических машин до современного уровня по индивидуальным потребностям эксплуатанта.

При этом требуется переоборудование материально-технического оснащения до современного уровня и разработка методического обеспечения для внедрения инновационных технологий в систему обслуживания и ремонта машин. Очевидно, что установка оборудования и использование аддитивных технологий позволят внедрить массовую кастомизацию, увеличив разнообразие технических решений, генерировать персонализированные компоновочные и конструктивные решения технологических машин аналогичного функционала.

Ключевым в эффективном внедрении механизма кастомизации компонентных составляющих машин, эксплуатируемых в АПК, является технологическое обеспечение процессов сервисного сопровождения [9].

В свою очередь, проведение конструктивной модернизации отдельных агрегатов требует расчетного обоснования согласованности параметров и геометрической совместимости компоновочных решений [10]. Предлагается механизм модульного замещения конструкций технологических средств *Next*-системами (системами следующего, передового поколения).

Введено понятие «*Next*-системы/механизмы», что предполагает классификацию элементов технических средств по признаку конструктивного совершенства. Здесь целесообразно проработать методику расчета уровня технического совершенства через сопоставление временных периодов: 0 уровень – базовое поколение, первый выпуск машины; *1-n* уровни – модификация машины на конкретном временном отрезке конструктивного приоритета; *Next* – уровень передовых конструктивных решений настоящего времени с лагом будущей перспективной приоритетности.

Расчетная модель периода технического совершенства, временной лаг, рассчитывается из выражения:

$$\tau = T_{in-tech} - T_{otech}, \quad (1)$$

где:  $T_{otech}$ ,  $T_{in-tech}$  – год выпуска машины и год внедрения инноваций соответственно.

Степень соответствия современным тенденциям  $\varepsilon$  можно представить коэффициентами значимости и уровня изменившихся социальных  $k_s$ , экономических  $k_e$ , экологических  $k_{ek}$  и прочих критериев (например, безопасность –  $k_r$ ), а также значений безопасности:

$$\varepsilon = k_s k_e k_{ek} k_r, \quad (2)$$

Количество включаемых коэффициентов вариативно и зависит от значимости и глубины оцениваемого критерия.

Значение коэффициента рассчитывается из относительности (*relative*) соотношения показателя в исчисляемом балльном диапазоне в базовый период выпуска машины  $T_0$  к величине, характеризующей показатель в настоящее время  $T_{Now}$ :

$$k_i = \frac{k_{i-relative}^{T_0}}{k_{i-relative}^{T_{Now}}}. \quad (3)$$

На начальном этапе реализации методики может быть выполнен упрощенный расчет путем введения базовой  $i$  и ее сопоставления в процентном соотношении реальному состоянию/положению исчисления показателя. Для перспективного расчетного периода применяется индекс бесконечности *inf*, который имеет лаг времени, характеризующий скорость технического прогресса рассматриваемой сферы:

$$k_i = \frac{k_{i-relative}^{T_0}}{k_{i-relative}^{T_{inf}}}. \quad (4)$$

Данная методика позволяет получить временной лаг остановки развития совершенствования конструкции в силу технических или технологических тенденций изменения прогресса.

Алгоритм решения задачи модернизации технологической машины включает установление оптимального значения количества компонентов, его функциональную, технологическую и факторную неопределенность по уровню совместимости.

*Пример реализации методики.* Кастомизация технологических машин, эксплуатируемых в производственных секторах АПК, нацелена на снижение негативного влияния на почвенный покров

и растительную среду [11].

В этом случае эксплуатанты в большей степени уделяют внимание ходовым элементам транспортно-технологической машины. Модальный анализ потребности в кастомизации эксплуатируемой машины представлен по данным технической характеристики разных типов ходовой части технологических машин (*табл.*).

Table		Таблица	
Значения показателей ходовой части технологических машин			
Values of the undercarriage indicators of technological machines			
Характеристика	Тракторы (ср. зн. показателей)	Мелиоративные машины	
		гусеничные, полужесткая, рычажно-балансировочная	упругая рычажно-балансировочная с РМШ
ходовая система	колесные 4К4	гусеничные, полужесткая, рычажно-балансировочная	упругая рычажно-балансировочная с РМШ
Удельная металлоемкость	0,6	0,75	0,7
Максимальный КПД	0,8	0,75	0,8
Максимальное удельное давление, кПа	100	200	100-110
Дорожный просвет, мм	Более 400	500	Более 300
Допустимая скорость, км/ч	43,2	10,8	21,6
Ресурс основных составных частей, мото-часы	8000	3500	6000
Наработка на отказ, мото-часы	1000	350	600

Рассматривая конструкцию ходовой части с точки зрения параметрической согласованности с современными требованиями эксплуатации, сложно установить на каком уровне совершенства находится технологическая машина разных лет выпуска. Так, трактор выпуска 2010 г. может считаться морально устаревшим по ряду конструктивных элементов, так как в 2020 г., т. е. за 10-летие инновации в техники и технологии позволили включить в конструкцию новые компоненты.

Выполненный анализ показывает, что ключевыми показателями функционирования можно выделить технические параметры ходовой части машины, в частности:

- общий показатель технического уровня (*general indicator of the technical level* –  $\sum I_{tech.lev}$ );

- материалоемкость ходовой и несущей систем (*material consumption of the chassis and carrier system* –  $M_{ch/c.s}$ );



- тягово-сцепные качества и проходимость (*indicator of traction and coupling qualities and cross-country ability* –  $I_{tr/cq}$ );
- плавности хода (*Smoothness indicator* –  $I_{s-th}$ );
- надежность ходовой части (*Undercarriage reliability indicator* –  $I_{u,r}$ );
- агротехнические нагрузки (степень воздействия на почву, показатель) (*agrotechnical (degree of impact on the soil, indicator)* –  $I_{agr}$ );
- сервисная технологичность (уровень модернизации) (*indicator of service manufacturability (level of modernization)* –  $I_{sm/m.lev}$ ).

Составляя цифровую модель при оценке уровня конструктивного совершенства отдельных компонентов ходовой части машины следует представленные выше параметры перевести в безразмерные величины. Значения, имеющие лучшие характеристики для функционирования машины приняты за 100% как базовые, а все отклонения переведены в соотношении к ним, что отражено на оси ординат инфограммы (рисунк).

Для формирования оси абсцисс также приняты безразмерные величины, характеризующие временной лаг в 10 лет, для чего в математической модели принят «обратный» отсчет технического совершенства. Очевидно, что сравнение проводится для текущего состояния развития техники и технологий как более продвинутого по сравнению с предыдущими годами. Учитывая, что нормированный срок эксплуатации машин закладывается производителем как минимум на десятилетие, хотя достаточно большое количество машин эксплуатируется со сроком службы 30 и более лет, то в расчетной модели выполнен сравнительный анализ показателей для машин с разницей производства в десятилетний период. В математической модели шкала отсчета выделяет 2010 г. выпуска машины, как «условно» устаревшую модель по ряду ключевых параметров функционирования, а также и «моральное устаревание» с точки зрения технологий производства (на шкале инфограммы это представлено безразмерным значением «-1»).

Производители для повышения конкурентоспособности постоянно вносят в конструкцию машины изменения в соответствии с новыми требованиями и имеющимися новыми технологиями, в частности в расчетном примере машина 2020 г. выпуска соответствует этим требованиям (на шкале инфограммы это представлено безразмерным значением «1»). Промежуточное значение в расчетной модели берется за показатель отсчета «0», когда, по заключению авторов, машина еще находится

на достаточном уровне эксплуатационной эффективности, но уже может быть обновлена в соответствии с имеющимися новациями, в частности, за точку отсчета можно принять период окончания гарантийного обслуживания предприятием-изготовителем (в расчетном примере этот период представлен 5 годами). По результатам расчетов выполнена визуализация в виде графиков, оценка по различным показателям проведена на лаге 10 лет.

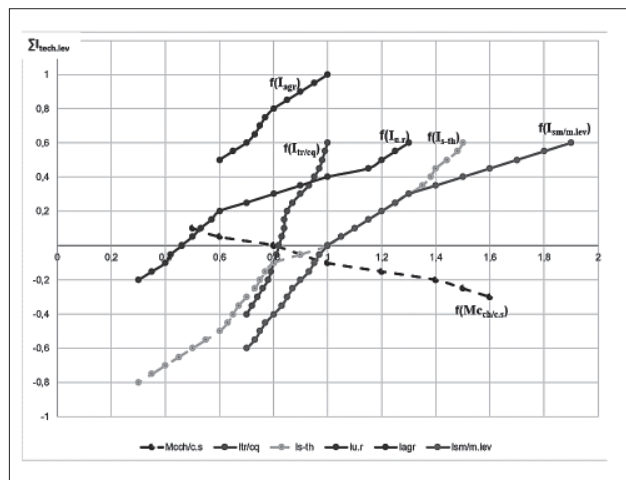


Рис. Модальный анализ уровня совершенства технологической машины на примере ходовой части в соотношении обобщенного показателя технического уровня к степени соответствия современным тенденциям конструктивного решения  
 Fig. Modal analysis of the perfection level of a technological machine using the chassis in the ratio of the generalized indicator of the technical level to the compliance with modern trends in the design solution

Оценка полученных данных показывает, что эксплуатанту следует заявить кастомизацию машины для снижения показателя функциональной характеристики воздействия на почву, проходимости в условиях повышенной влажности и надежности гусеничного движителя. В свою очередь, проведение «моральной» модернизации машины позволяет без существенных затрат повысить энергонасыщенность за счет замены ДВС и проходимость за счет установки гусениц с резинометаллическими шарнирами, а также надежность, установив адаптивные электронные системы [12].

Преимущество данного метода заключается в возможности получения для машины в целом или для отдельных ее систем и механизмов интенсивности обновления и/или ее приспособленности к внедрению новых конструктивных решений [13].

Современные программные интеллектуальные ресурсы позволяют создать имитационную модель с учетом влияния временного фактора и предло-

жить прогноз оптимальной эффективности модернизации технологических машин с решением технологической совместимости [14].

**Выводы.** Рассмотрели пути совершенствования сельскохозяйственных машин производителями для повышения их конкурентоспособности [15].

Выделили проблему замены машин, исчерпавших срок службы, на новые, конструктивно усовершенствованные. В доказательной форме показали, что часть компонентов имеет остаточный ресурс и способность продолжать эффективно функционировать. Предложили использовать ресурсные резервы машин путем обоснования продления их срока службы. Дали рекомендации для эксплуатантов по индивидуализации архитектуры конструктивной кастомизации технологических машин, эксплуатируемых в сфере АПК. Инновационные технологические процессы модернизации машин предложили внедрить в организационную структуру сервисных организаций путем проведения реинжиниринга производственно-технической инфраструктуры [16].

Рекомендовали при оценке уровня технического совершенства машин выполнять сопоставление временных периодов технического прогресса. В качестве примера выполнили модальный анализ ходовой части технологических машин. Обосновали ресурсосберегающий эффект внедрения методики реинжиниринга сервисной организации с включением модели кастомизации сельскохозяйственных машин с обоснованием периода продления срока службы.

### Библиографический список

1. Бурак П.И., Голубев И.Г. Обновление парка сельскохозяйственной техники в рамках ведомственного проекта «Техническая модернизация агропромышленного комплекса» // *Техника и оборудование для села*. 2023. N7(313). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-7-2-7.
2. Бурак П.И., Голубев И.Г. Анализ динамики обновления парка сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*. 2022. N7(301). С. 29-32. DOI 10.33267/2072-9642-2022-7-29-32.
3. Богомолов А.А., Севрюгина Н.С. Вариационная трактовка жизненного цикла технических систем // *Строительные и дорожные машины*. 2010. N10. С. 48-52. EDN: QZCJPH.
4. Жалнин Э.В., Зубина В.А. Обоснование типовых сельскохозяйственных территорий для разработки региональных систем машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 82-89. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89.
5. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Баулин Н.К. и др. *Техническое сопровождение сельскохозяйственной техники* // *Технический сервис машин*. 2022. Т. 60. N2(147). С. 51-59. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-51-59.
6. Апатенко А.С. Совершенствование системы технической эксплуатации при импортозамещении машин для выполнения мелиоративных работ // *Природообустройство*. 2015. N2. С. 74-77. EDN: UFEXIT.
7. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
8. Водяников В.Т. Тенденции совершенствования технических средств и сменяемости технологических укладов производства // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N2. С. 76-80. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-2-76-80.
9. Казакова В.А. Перспектива развития стандартизации в области технического сервиса // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N4(153). С. 54-60. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-54-60.
10. Федотов А.В., Дорохов А.С., Гвоздев А.А. Триботехнические материалы для технического обслуживания сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. Т. 60. N4(149). С. 37-45. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.
11. Кравченко И.Н., Ерофеев М.Н., Кузнецов Ю.А. и др. Трибологические исследования процессов изнашивания рабочих органов технологического оборудования агропромышленного комплекса // *Агроинженерия*. 2020. N4(98). С. 33-40. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-33-40.
12. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Сибгагуллина Р.Ф. и др. Конкурентоспособная отечественная техника и технология органического земледелия // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2023. Т. 13. N6-1. С. 416-430. DOI: 10.34670/AR.2023.51.99.050.
13. Малыха Е.Ф., Катаев Ю.В. Оценка технической оснащенности аграрного производства // *Экономика сельского хозяйства России*. 2019. N6. С. 62-68. DOI: 10.32651/196-62.
14. Катаев Ю.В., Градов Е.А., Тишанинов И.А. Контроль технического состояния сельскохозяйственной техники через онлайн мониторинг параметров // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2022. N1. С. 14-19. DOI: 10.33920/sel-10-2201-03.
15. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. N2(102). С. 45-50. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-45-50.
16. Apatenko A., Sevryugina N. Tensometry of interfaces of the working body of technology machines for reclamation works. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022.

Vol. 247. 73-81. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_9.

### References

1. Burak P.I., Golubev I.G. Renewal of the agricultural machinery park within the framework of the departmental project «Technical modernization of the agro-industrial complex». *Machinery and equipment for rural area*. 2023. N7(313). 2-7 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-7-2-7.

2. Burak P.I., Golubev I.G. Analysis of the dynamics of agricultural machinery fleet renewal. *Machinery and equipment for rural area*. 2022. N7(301). 29-32 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-7-29-32.

3. Bogomolov A.A., Sevryugina N.S. Variational interpretation of the life cycle of technical systems. *Construction and road vehicles*. 2010. N10. 48-52 (In Russian). EDN: QZCJPH.

4. Zhalnin E.V., Zubina V.A. Substantiation of typical agricultural areas as a methodological basis for the development of regional machine systems. *Agricultural machines and technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 82-89 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89.

5. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Baulin N.K., et al. Technical support of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2022. Vol. 60. N2(147). 51-59 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-51-59.

6. Apatenko A.S. Improvement of the technical operation system under machinery import substitution for fulfillment of reclamation works. *Prirodobustrojstvo*. 2015. N2. 74-77 (In Russian). EDN: UFEXIT.

7. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural machines and technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.

8. Vodyannikov V.T. Trends in the improvement of technical means and the replaceability of technological modes of production. *Agricultural engineering*. 2022. Vol. 24. N2. 76-80 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-2-76-80.

9. Kazakova V.A. Perspective for the development of standardization in the technical service. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N4(153). 54-60 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-54-60.

10. Fedotov A.V., Dorokhov A.S., Gvozdev A.A. Tribotechnical materials for the maintenance of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2022. Vol. 60. N4(149). 37-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.

11. Kravchenko I.N., Erofeev M.N., Kuznetsov Yu.A., et al. Tribological studies of the friction and wear of working elements of technological equipment. *Agricultural engineering*. 2020. N4(98). 33-40 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-33-40.

12. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Sibagatullina R.F., et al. Competitive domestic technology and technology of organic farming. *Economics: Yesterday, Today and*

*Tomorrow*. 2023. Vol. 13. N6-1. 416-430 (In Russian). DOI: 10.34670/AR.2023.51.99.050.

13. Malykha E.F., Katayev Yu.V. Assessment of technical equipment of agricultural production. *The economy of agriculture in Russia*. 2019. N6. 62-68 (In Russian). DOI: 10.32651/196-62.

14. Kataev Yu.V., Gradov E.A., Tishaninov I.A. Control of the technical condition of agricultural machinery through online monitoring of parameters. *Agricultural machinery: maintenance and repair*. 2022. N1. 14-19 (In Russian). DOI: 10.33920/sel-10-2201-03.

15. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural engineering*. 2021. N2(102). 45-50 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-45-50.

16. Apatenko A., Sevryugina N. Tensometry of interfaces of the working body of technology machines for reclamation works. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 247. 73-81. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_9.

### Заявленный вклад соавторов

Сеvрюгина Н.С. – научное руководство, подготовка материалов и методов;  
Фомин А.Ю. – анализ результатов подготовленных материалов и методов;  
Рысев М.Д. – получение исходной информации, обработка данных, подготовка текста;  
Шугаев А.Ю. – доработка текста, анализ литературных данных.  
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution

Sevryugina N.S. – scientific management, preparation of materials and methods;  
Fomin A.Yu. – analysis of the results of the prepared materials and methods;  
Rysev M.D. – obtaining initial information, data processing, writing the manuscript;  
Shugaev A.Yu. – revision of the manuscript, analysis of literature data.

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 14.12.2023**

**Статья принята к публикации 26.01.2024**



## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ С УЧЕТОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ



<sup>1</sup>Илдар Исмагилович Габитов, доктор технических наук,  
профессор, e-mail: rektor\_bgau@mail.ru;

<sup>1</sup>Андрей Владимирович Неговора, доктор технических наук, профессор;

<sup>1</sup>Марс Нуруллович Фархиатов, доктор технических наук, профессор;

<sup>1</sup>Азамат Фаритович Фаюришин, кандидат технических наук;

<sup>2</sup>Павел Августович Иофинов, заместитель министра сельского хозяйства Республики Башкортостан;

<sup>3</sup>Рустам Хабибович Зайнуллин, исполнительный директор;

<sup>4</sup>Фларис Рифкатович Шайхетдинов, кандидат экономических наук, генеральный директор

<sup>1</sup>Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа,  
Республика Башкортостан, Российская Федерация

<sup>2</sup>Министерство сельского хозяйства Республики Башкортостан,  
г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация

<sup>3</sup>Ассоциация ремонтно-обслуживающих предприятий агропромышленного комплекса  
Республики Башкортостан, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация

<sup>4</sup>ООО Машино-технологический комплекс «Башсельхозтехника»,  
р-н Уфимский, Республика Башкортостан, Российская Федерация

**Реферат.** Техническая оснащенность сельскохозяйственного производства в России характеризуется низким уровнем энергообеспеченности. В регионах страны, где удалось стабилизировать резкое снижение технической оснащенности, наблюдается уменьшение количества машин, выработавших нормативный срок эксплуатации. (Цель исследования) Оценить эксплуатационную надежность сельскохозяйственной техники с учетом региональных особенностей системы технического обслуживания, капитально-восстановительного ремонта и модернизации техники. (Материалы и методы) Отметили, что в Республике Башкортостан реализуется программа субсидирования затрат сельхозтоваропроизводителей на проведение капитально-восстановительного ремонта и модернизации техники, которая позволила существенно повысить коэффициент готовности тракторов и комбайнов при увеличении их нормативного срока эксплуатации. (Результаты и обсуждение) Установили, что эксплуатационная надежность сельскохозяйственной техники в значительной мере обеспечивается с учетом региональных особенностей системы технического обслуживания и ремонта, которая определяется ведущей и координирующей ролью регионального Министерства сельского хозяйства в сфере государственной поддержки системы технического сервиса сельскохозяйственной техники, научно-технической и кадровой политики. Выявили направления деятельности инженерной службы Минсельхоза Республики Башкортостан: субсидирование предприятий технического сервиса; разработка средств и технологий технического обслуживания и ремонта (импортозамещение); координация работы для серийного производства новых видов техники; организация взаимодействия с промышленными предприятиями; поиск и разработка конструктивных решений по совершенствованию конструкции узлов и агрегатов; создание дилерами на территории курируемых регионов зональных сервисных центров; повышение квалификации и переподготовка инженерных кадров; создание систематизированной каталожной базы данных деталей тракторов и мобильной сельскохозяйственной техники; развитие вторичного рынка и системы трейд-ин сельскохозяйственной техники. (Выводы) Определили меры воздействия на систему технического обслуживания и ремонта с учетом региональных особенностей в сфере государственной поддержки системы технического сервиса сельскохозяйственной техники, научно-технической и кадровой политики региона.

**Ключевые слова:** техническая оснащенность, эксплуатационная надежность, сельскохозяйственная техника, государственная поддержка, энергообеспеченность, капитально-восстановительный ремонт, модернизация техники.



*Для цитирования:* Габитов И.И., Неговора А.В., Фархшатова М.Н., Фаюршин А.Ф., Иофинов П.А., Зайнуллин Р.Х., Шайхетдинов Ф.Р. Обеспечение эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники с учетом региональных особенностей // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 36-43. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-36-43. EDN: JIXPHT.

Review article

## ENSURING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY TAKING INTO ACCOUNT REGIONAL FEATURES

<sup>1</sup>Ildar I. Gabitov, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>1</sup>Andrey V. Negovora, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>1</sup>Mars N. Farkhshatov, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>1</sup>Azamat F. Fayurshin, Ph.D.(Eng.),

<sup>2</sup>Pavel A. Iofinov, Deputy Minister of Ministry of Agriculture of the Republic of Bashkortostan,

<sup>3</sup>Rustam K. Zainullin, Executive Director

<sup>4</sup>Flaris R. Shaikhetdinov, Ph.D.(Econ.), General Director

<sup>1</sup>Bashkir State Agrarian University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

<sup>2</sup>Ministry of Agriculture of the Republic of Bashkortostan,

Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

<sup>3</sup>Association of Repair and Servicing Enterprises of the Agro-Industrial Complex of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

<sup>4</sup>Limited liability company Machine and technological complex "Bashselkhoztekhnika", Ufa district, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

**Abstract.** The technical equipment of agricultural production in Russia is characterized by a low level of energy supply. In the regions of the country, where a sharp decrease in technical equipment has been stabilized, there is a decrease in the number of machines that have developed a standard service life. (Research purpose) The research purpose is assessing the operational reliability of agricultural machinery taking into account the regional features of the maintenance system, capital repairs and modernization of machinery. (Materials and methods) It was noted that in the Republic of Bashkortostan, a program is being implemented to subsidize the costs of agricultural producers for capital repairs and modernization of equipment, which has significantly increased the availability factor of tractors and combines while increasing their standard service life. (Results and discussion) It was established that the operational reliability of agricultural machinery is largely ensured taking into account the regional characteristics of the maintenance and repair system, which is determined by the leading and coordinating role of the regional Ministry of Agriculture in the field of state support for the technical service system of agricultural machinery, scientific, technical and personnel policy. The directions of activity of the engineering service of the Ministry of Agriculture of the Republic of Bashkortostan have been identified: subsidizing technical service enterprises; development of tools and technologies for maintenance and repair (import substitution); coordination of work for the serial production of new types of equipment; organization of interaction with industrial enterprises; search and development of constructive solutions to improve the design of components and assemblies; creation of zonal service centers by dealers in the territory of supervised regions; advanced training and retraining of engineering personnel; creation of a systematic catalog database data on tractor parts and mobile agricultural machinery; the development of the secondary market and the trade-in system of agricultural machinery. (Conclusions) Measures of influence on the system of maintenance and repair were determined, taking into account regional peculiarities in the field of state support for the system of technical service of agricultural machinery, scientific, technical and personnel policy of the region.

**Keywords:** technical equipment; operational reliability; agricultural machinery; state support; energy supply; capital repair; modernization of machinery.

**For citation:** Gabitov I.I., Negovora A.V., Farkhshatov M.N., Fayurshin A.F., Iofinov P.A., Zainullin R.H., Shaikhetdinov F.R. Ensuring the operational reliability of agricultural machinery taking into account regional features. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. №1. 36-43 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-36-43. EDN: JIXPHT.

Техническая оснащенность сельскохозяйственного производства регионов России в значительной мере определяется уровнем развития аграрного сектора экономики. В Республике Башкортостан площадь сельхозугодий составляет 7,069 млн га, из них пашня – 3,637 млн га. Валовый сбор зерновых составил в 2022 г. 5,2 млн т., в 2023 г. на 1 октября намолочено 3,2 млн т. [1].

Территория республики разделена на шесть сельскохозяйственных зон, отличающихся природно-климатическими условиями и, соответственно, районированными культурами и технологиями их возделывания, уровнем развития животноводства. Следует отметить, что в валовой региональной продукции сельского хозяйства преобладает животноводческая составляющая. На уровень распределения трудовых ресурсов и размещения промышленных производств существенное влияние оказывает наличие горно-лесной зоны Южного Урала. Республика характеризуется сравнительно высоким уровнем численности населения, проживающим в сельской местности (38% от 4,1 млн чел.). Уровень механизации и энергообеспеченности региона, призванного обеспечить должное ведение аграрного производства, в целом характеризуется качественными показателями, которые выше среднероссийских, но ниже относительно нормативных [2].

Виды техники	2012 г.	2017 г.	2022 г.
Тракторы	17137	14839	15162
Кормоуборочные комбайны	984	766	804
Зерноуборочные комбайны	3639	3663	4043
Свеклоуборочные комбайны	223	139	132
Посевные машины	9560	8992	9210
Плуги	5360	5082	5190
Культиваторы	7330	6129	6246

**Цель исследования** – оценить эксплуатационную надежность сельскохозяйственной техники с учетом региональных особенностей системы технического обслуживания, капитально-восстановительного ремонта и модернизации техники.

**Материалы и методы.** До 2011 г. ежегодное выбытие основных видов техники в сельскохозяйственных организациях республики в 3-5 раз превышало поступление новой. Количество тракторов и самоходных уборочных комбайнов за пре-

делами нормативных сроков эксплуатации достигало 90% к наличию парка при среднем возрасте 18 и более лет. Из-за низкой обеспеченности техникой оптимальные сроки механизированных работ по посеву и уборке сельхозкультур не соблюдались, а потери урожая доходили до 30%. Уровень технической оснащенности агропромышленного сектора региона в период с 1998 по 2011 г. поддерживался покупкой в основном импортной техники исключительно за счет республиканских бюджетных ассигнований путем создания республиканских машинно-технологических станций.

В настоящее время в республике успешно реализуется программа обновления парка сельскохозяйственной техники, предусматривающая возмещение части затрат сельхозтоваропроизводителей на приобретение приоритетных видов техники. За десять последних лет аграриями республики приобретено более 31 тыс. единиц техники и оборудования на общую сумму 68,3 млрд руб. (табл. 2). При этом только из бюджета республики сельхозтоваропроизводителям было выплачено субсидий в сумме более 14 млрд руб.

Год	Количество, ед.		Сумма, млрд руб
	всего	в т.ч. импортной	
2012	3 590	436	3,9
2013	3 721	405	4,6
2014	2 620	301	4,1
2015	2 145	202	2,8
2016	2 185	176	3,5
2017	2 058	278	3,7
2018	1 966	233	4,2
2019	2 820	336	6,5
2020	3 607	484	10,1
2021	3 444	605	12,0
2022	3 223	441	12,9
Итого	31 379	3 897	68,3

**Результаты и обсуждение.** Эффективность прямой господдержки сельхозтоваропроизводителей с использованием средств республиканского бюджета повышается за счет скидок на технику в рамках реализации федеральной программы субсидирования российских производителей сельхозтехники и приобретения техники через Росагро-

лизинг. Доля зарубежной техники в общих объемах закупки в настоящее время не превышает 13%.

Активное обновление техники в последние годы позволило остановить процесс сокращения численного состава машинно-тракторного парка, а количество уборочной техники даже увеличить. При этом улучшаются износные показатели и снижаются нагрузки на технику при выполнении механизированных сельскохозяйственных работ.

Количество выработавших нормативные сроки эксплуатации тракторов уменьшилось с 85 до 65%, при этом их средний возраст сократился с 18,2 до 16,7 лет. Износные показатели самоходных уборочных комбайнов в среднем не превышают 51% (2012 г. – 76%) к наличию парка при среднем возрасте 11,7 лет (2012 г. – 14,8 лет) (табл. 3.)

Наименование	Годы		
	2012	2017	2022
Средний возраст, (лет):			
- тракторы;	18,2	17,5	16,7
- зерноуборочные комбайны;	14,8	12,4	11,7
- кормоуборочные комбайны	11,4	11,2	10,2
Процентный состав техники выше нормативного срока эксплуатации, (%):			
- тракторы,	85	68,7	65,0
- зерноуборочные комбайны;	76	64,0	51,0
- кормоуборочные комбайны	62	58,9	51,4

Нагрузку на комбайны при обмолоте зерновых культур в среднем по республике удалось снизить с 510 до 430 га на комбайн. Несмотря на значительную государственную поддержку, техническая обеспеченность основными видами техники в отдельных районах и сельхозпредприятиях остается недостаточной относительно нормативов (табл. 4).

С учетом выбытия мобильной сельскохозяйственной техники для достижения нормативных показателей технической оснащенности предприятий АПК Республики Башкортостан ежегодно требуется закупать не менее 600 тракторов различного тягового класса, 250 зерноуборочных и 50 кормоуборочных комбайнов. При этом общая комплексная задача на ближайшие годы состоит в повышении энергообеспеченности сельскохозяйственных организаций республики до 230-250 л. с. на 100 га посевной площа-

Table 4 Таблица 4  
Состояние и целевые показатели технической оснащенности предприятий АПК для Республики Башкортостан  
The state and target indicators of technical equipment of agricultural enterprises for the Republic of Bashkortostan

Наименование показателей	2012 г.	2017 г.	2022 г.	Целевые показатели
Нагрузка на 1 трактор, га пашни	214	220	225	180
Количество тракторов на 1000 га пашни, шт.	4,7	4,6	4,5	6,0
Нагрузка на 1 зерноуборочный комбайн, га	510	480	430	350
Количество комбайнов на 1000 га посевной площади, шт. (зерно-, кормо-, свеклоуборочные)	2,2 / 2,4 / 3,0	2,1 / 2,4 / 2,7	2,3 / 2,1 / 2,4	2,9 / 3,0 / 3,5
Энергообеспеченность, л. с. на 100 га посевной площади	180	176	182	230

ди при существующем значении около 180 л. с. [3].

На обеспечение эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники в современных условиях все большее влияние начинает оказывать ряд новых реалий. Современная техника, поступающая в рамках обновления машинно-тракторного парка, характеризуется повсеместным использованием высокотехнологичных агрегатов и узлов с электро-, гидро-, пневмоприводами и работающих под руководством электронных блоков управления. Повышение качества обработки деталей и быстродействия электронно-управляемых элементов в гидравлических и топливоподающих системах предъявляет высокие требования к технологиям ремонта и квалификации персонала. Наблюдается повышение требований к производственным условиям ТО и ремонта современных гидравлических, пневмотических и топливоподающих систем, к примеру, для сборочных операций реализуется концепция «чистой комнаты», в которой двери помещения и тамбура должны быть изолирующими, воздухонепроницаемыми, а приточно-вытяжная вентиляция обеспечивать воздухообмен не менее 10 м<sup>3</sup>/час при классе фильтрации не ниже F5 и превышением подачи воздуха (в объеме) над вытяжкой в доле 10÷15% и пр. [4].

Качественный технический сервис заключается в применении современного высокотехнологичного оборудования и программного обеспечения для исключения человеческого фактора с автоматизацией испытаний на стационарных стендах в соответствии с тест-планами производителя. Сегодня в функции слесаря-механика, переходящего в каче-

ство слесаря-механотроника, добавляются новые компетенции, основанные на синергетическом объединении знаний узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с элементами программирования.

Цифровизация и автоматизация сельскохозяйственных процессов и связанные с данными процессами конструктивные изменения и программное обеспечение в системах управления технологическими процессами и оборудованием – следующая важная особенность, должное функционирование которой возлагается на инженерно-техническую службу предприятий технического сервиса.

Уход западных производителей техники вызвал нарушение сложившейся системы обновления МТП и его технического обслуживания. Резкое увеличение поставщиков из Азии позволяет заменить выбывающую технику новой, но при этом не проработана и отсутствует система технического обслуживания и сервиса данной техники в эксплуатации. Проведенные нами в 2022 г. предварительные сравнительные испытания мобильной техники новых азиатских брендов выявили ряд конструктивных и эксплуатационных вопросов:

- заявленные технические характеристики не соответствуют фактическим показателям их работы;
- техника не адаптирована к российским ГОСТ на топливо и масла;
- навеска большинства тракторов конструктивно не подходит к имеющимся в хозяйствах сельскохозяйственным орудиям;
- имеет место отсутствие разветвленной дилерской службы и специалистов для своевременного ТО и устранения гарантийных отказов;
- производители не предоставляют каталоги запчастей и технические данные для ТО и ремонта новой техники;
- не проработаны вопросы обеспеченности запасными частями и расходными материалами, отсутствуют складские запасы, длительные сроки поставки и пр.

По отзывам потребителей, фактически единственным положительным качеством доступных в настоящее время для покупки зарубежных машин является сравнительно низкая цена машин и оборудования. Следующая особенность технической оснащённости АПК, влияющей на эксплуатационную надёжность машин, заключается в том, что в современных условиях в нашей стране идет постоянная модернизация производства, меняются поставщики отдельных узлов и комплектующих, в связи с чем в конструкцию машин вносятся различные изменения [5, 6].

При этом в сопроводительной технической документации к современной технике, в т. ч. российского и белорусского производства, отсутствует актуализированная информация по артикулам деталей, по маршрутным технологическим картам процессов ремонта узлов и агрегатов. Идентификация многих запасных частей при ТО и ремонте становится острой проблемой. Жизненно необходимо обязать производителей предоставлять такую информацию всем потребителям или на государственном уровне создать систематизированную каталожную базу данных по всем деталям тракторов и мобильной сельскохозяйственной техники отечественного производства (кросс-номера артикулов деталей). Структурные изменения хозяйствующих субъектов аграрного комплекса региона оказывают определяющее влияние на систему технического обслуживания и ремонта имеющейся сельскохозяйственной техники (табл. 5)[7].

Крупные предприятия имеют собственную базу по техническому обслуживанию и ремонту, договорные отношения с дилерскими центрами по агрегатному ремонту высокотехнологичных узлов и техническому сопровождению машин и оборудования и специализированному ремонту высокотехнологичных узлов и агрегатов не превышают 7%.

Площадь сельхозугодий	1-50 га	50-1000 га	1,0-5,0 тыс. га	5,0-10,0 тыс. га	10,0-50,0 тыс. га
Количество предприятий	80	825	401	74	26

Существующая на сегодня организационная и производственная инфраструктура инженерно-технического обеспечения предприятий агропромышленного комплекса в Республике Башкортостан в основном сохранена в традиционном виде с середины 70-х годов прошлого века (рис. 1).

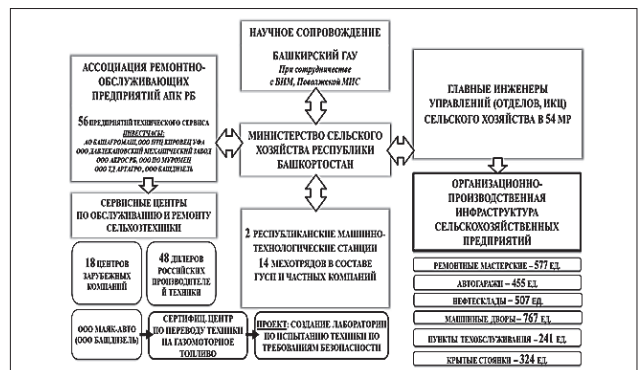


Рис. 1. Структура инженерно-технического обеспечения АПК Республики Башкортостан

Fig. 1. Structure of engineering and technical support of



*the agro-industrial complex of the Republic of Bashkortostan*

В сельскохозяйственных предприятиях в достаточном количестве остаются действующими машинные дворы (759 ед.), ремонтные мастерские (573 ед.), пункты технического обслуживания (238 ед.), автогаражи (444 ед.), нефтесклады (508 ед.), крытые стоянки для сельхозтехники (325 ед.) [8].

Во всех 54 муниципальных районах имеются службы главного инженера управлений (отделов) сельского хозяйства [9].

Функционируют две крупные республиканские машинно-технологические станции, один мехотряд в составе государственного унитарного предприятия и частные мехотряды, которые оказывают услуги сельхозтоваропроизводителям по выполнению основных полевых механизированных работ (Бутов А.М. Рынок сельскохозяйственных машин. М.: Высшая школа экономики. 2019. 87 с.). Техническое обслуживание и ремонт техники, узлов и агрегатов проводится на базе 36 ремонтно-технических предприятий и сервисными службами 52 официальных дилеров заводов-изготовителей российской и зарубежной сельхозтехники, имеющих на территории Республики Башкортостан производственные базы [10].

Дилерскими центрами за последние 5 лет построено 10 новых современных производственно-сервисных баз. Административное сопровождение деятельности предприятий инженерно-технического обеспечения АПК региона проводится Министерством сельского хозяйства республики [11].

Направления деятельности инженерной службы Минсельхоза РБ:

- разработка предложений в нормативно-правовые акты Республики Башкортостан по развитию и совершенствованию мер поддержки инженерно-технической службы АПК;

- создание дилерскими центрами на территории муниципальных районов сервисных участков для оперативного проведения обслуживания и устранения неисправностей реализуемой техники в гарантийный и постгарантийный сроки эксплуатации (через инвестчасы Правительства РБ, льготы и преференции);

- организация сбора оперативных данных о ходе ремонта техники, узлов и агрегатов, а также информирования о технологических возможностях специализированных ремонтных и машиностроительных предприятий;

- координация работы поставщиков и изготовителей новых запасных частей;

- организация проведения входного контроля изготавливаемых предприятиями Республики Башкортостан запасных частей на базе производствен-

ного участка Башкирского ГАУ совместно с ООО ПТЦ «Башагропромстандарт»;

- осуществление контроля за соблюдением нормативных требований сертифицированными ремонтными предприятиями совместно с ООО ПТЦ «Башагропромстандарт»;

- создание дилерскими центрами сервисных участков на территории муниципальных районов для оперативного проведения обслуживания и устранения неисправностей реализуемой техники в гарантийный и постгарантийный сроки эксплуатации (через инвестчасы Правительства РБ, льготы и преференции);

- организация на местах «Дней качества» путем проведения выездных заседаний Совета Ассоциации ремонтно-обслуживающих предприятий агропромышленного комплекса Республики Башкортостан;

- организация проведения курсов переподготовки и повышения квалификации представителей ИТР, рабочего персонала, механизаторов сельхозорганизаций и специалистов ремонтных предприятий;

- проведение республиканских семинаров, совещаний и пр.

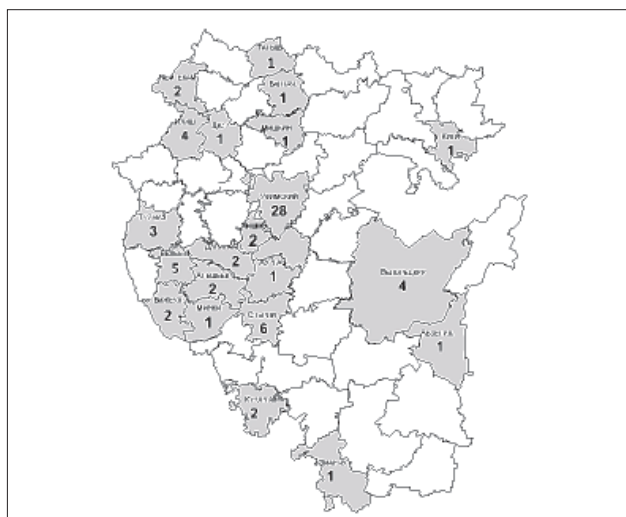


Рис. 2. Расположение предприятий по производству, ремонту и модернизации сельхозтехники, изготовлению импортзамещающих запасных частей на территории Республики Башкортостан  
Fig. 2. Location of enterprises for the production, repair and modernization of agricultural machinery, manufacture of import-substituting spare parts on the territory of the Republic of Bashkortostan

Для повышения технической оснащенности Минсельхозом РБ ведется также целенаправленная работа с предприятиями регионального сельхозмашиностроения (рис. 2).

Предприятиями республики освоен серийный выпуск более 350 видов и модификаций техники, не уступающих по техническим характеристикам

зарубежным аналогам, например, самоходная ко-силка «Чулпан» (аналог МакДон М150). Производитель данной машины АО «БашАгроМаш» (г. Стерлитамак) в 2017 г. аккредитован Минпромторгом России в качестве участника федеральной программы субсидирования российских изготовителей техники, а с 2020 г. – в качестве поставщика АО «Росагролизинг».

Эксплуатационная надежность сельскохозяйственной техники в значительной мере обеспечивается с учетом региональных особенностей системы технического обслуживания и ремонта, которая определяется ведущей и координирующей ролью регионального Министерства сельского хозяйства в сфере государственной поддержки системы технического сервиса сельскохозяйственной техники, научно-технической и кадровой политики и связана с:

- субсидированием ремонтных предприятий при приобретении нового и модернизированного технологического и станочного оборудования для технического сервиса;

- разработкой собственных и модернизацией предлагаемых производителями средств и технологий ТО и ремонта (импортозамещение);

- координацией работы в части приобретения современного специализированного ремонтно-технологического оборудования и изготовления комплектующих для серийного производства новых видов техники;

- организацией взаимодействия с промышленными предприятиями по освоению технологий производства запасных частей к СХТ;

- поиском и разработкой и конструктивных решений по модернизации узлов и агрегатов и в целом машины к реальным условиям эксплуатации в целях повышения их срока службы;

- созданием дилерами на территории курируемых регионов зональных сервисных центров для проведения регламентного обслуживания и ремонта поставляемой техники в гарантийные, постгарантийные сроки эксплуатации;

- повышением квалификации и переподготовкой кадров инженерных кадров, в том числе узкого профиля, реализуемых с использованием мер господдержки;

- созданием систематизированной каталожной базы данных деталей тракторов и мобильной сельскохозяйственной техники отечественного и зарубежного производства;

- развитием вторичного рынка и системы трейдин сельскохозяйственной техники.

### Библиографический список

1. Габитов И.И., Мударисов С.Г., Иофинов П.А. Региональные меры государственной поддержки повышения уровня технической оснащенности предприятий агропромышленного комплекса // *Технический сервис машин*. 2020. Т. 58. N2(139). С. 83-96. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-83-95.

2. Соловьев С.А. О программе модернизации инженерно-технологического обеспечения АПК // *Труды ГОСНИТИ*. 2014. Т. 117. С. 9-18.

3. Габитов И.И., Шайхетдинов Ф.Р., Неговора А.В. Модернизация эксплуатируемой сельскохозяйственной техники как эффективный фактор повышения уровня технической оснащенности // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2020. N3(55). С. 95-99. DOI: 10.31563/1684-7628-2020-55-3-95-99.

4. Кунафин А.Ф., Саматов Р.А., Гафурзянов К.К. Определение расхода топлива грузовых автомобилей на основе нагрузочных и скоростных режимов работы // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2012. N2. С. 40-41. EDN: PABOZT.

5. Fayurshin A., Farkhshatov M., Saifullin R., et al. Improving the durability of cultivator blades using one-sided gas-flame surfacing. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19. N1. 57-67. DOI: 10.5937/jaes0-27725.

6. Кушнарев Л.И. Повышение качества машин и оборудования на основе фирменного технического сервиса // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N3(152). С. 46-50. DOI: 10.22314/2618-8287-2023- 61-3-46-50.

7. Лялякин В.П., Кравченко И.Н., Корнеев В.М. Централизованное восстановление деталей на предприятиях системы «Союзсельхозтехника» и «Госкомсельхозтехника» // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2023. N5. С. 45-52. DOI: 10.31857/S0235711923050127.

8. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Мишина З.Н. и др. Пути совершенствования инженерно-технической системы в АПК // *Технический сервис машин*. 2021. N4. С.40-48. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-40-48.

9. Gaskarov I.R., Farkhshatov M.N., Saifullin R.N., et al. Cylindrical interfaces repair technique using electric resistance welding of metal powder materials. *Results in Engineering*. 2022. Vol. 16. 100699. DOI: 10.1016/j.rinen.2022.100699.

10. Pavlov A., Saifullin R., Farkhshatov M., et al. Study of part restoration modes using electrocontact welding with gauze filler materials. *International Journal on Engineering Applications*. 2021. Vol. 9. N2. С. 62-70. DOI: 10.15866/irea.v9i2.19511.

11. Рахимов Р.С., Мударисов С.Г., Рахимов И.Р. Разработка ресурсосберегающей технологии и обоснование параметров комплекса машин для возделывания

сельскохозяйственных культур в зоне Урала // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2018. N2(46). С. 117-129. DOI: 10.31563/1684-7628-2018-46-2-117-129.

### References

1. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Iofinov P.A. Regional measures of state support for increasing the technical equipment of machine and tractor fleet of agricultural enterprises. *Machinery technical service*. 2020. Vol. 58. N2(139). 83-96 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-83-95.

2. Solovyov S.A. On the program of modernization of engineering and technological support of the agro-industrial complex. *Proceedings of GOSNITI*. 2014. Vol. 117. 9-18 (In Russian).

3. Gabitov I.I., Shaihutdinov F.R., Negovora A.V. Improvements in the in-service agricultural machinery as an effective factor for better equipment. *Vestnik Bashkir state agrarian university*. 2020. N3(55). 95-99 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2020-55-3-95-99.

4. Kunafin A.F., Samatov R.A., Gafurzyanov K.K. Method for determination of trucks' fuel consumption on basis of work's load and speed conditions. *Vestnik Bashkir state agrarian university*. 2012. N2. 40-41 (In Russian). EDN: PABOZT.

5. Fayurshin A., Farkhshatov M., Saifullin R., et al. Improving the durability of cultivator blades using one-sided gas-flame surfacing. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19. N1. 57-67. DOI: 10.5937/jaes0-27725.

6. Kushnarev L.I. Improving the quality of machinery and equipment based on a proprietary technical service. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N3(152). 46-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-3-46-50.

7. Lyalyakin V.P., Kravchenko I.N., Korneev V.M. Centralized restoration of parts at enterprises of the Soyuzselkhoztekhnik and Goskomselkhoztekhnik systems. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2023. N5. 45-52 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711923050127.

8. Katayev Yu.V., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., et al. Ways to improve the engineering and technical system in the agro-industrial complex. *Machinery technical service*. 2021. N4. 40-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-40-48.

9. Gaskarov I.R., Farkhshatov M.N., Saifullin R.N., et al. Cylindrical interfaces repair technique using electric resistance welding of metal powder materials. *Results in Engineering*. 2022. Vol. 16. 100699. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100699.

10. Pavlov A., Saifullin R., Farkhshatov M., et al. Study of part restoration modes using electrocontact welding with gauze filler materials. *International Journal on Engineering Applications*. 2021. Vol. 9. N2. С. 62-70. DOI: 10.15866/irea.v9i2.19511.

11. Rakhimov R.S., Mudarisov S.G., Rakhimov I.R. Development of resource-saving technology and justification of parameters of machinery complex for agricultural crops in the urals region. *Vestnik Bashkir state agrarian university*. 2018. N2(46). 117-129 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2018-46-2-117-129.

### Заявленный вклад соавторов

Габитов И.И. – научное руководство, анализ и доработка текста;

Неговора А.В. – подготовка и анализ литературных данных;

Фархшатов М.Н. – подготовка текста, анализ литературных данных;

Фаюрушин А.Ф. – подготовка и редактирование текста, анализ литературных данных;

Иофинов П.А. – подготовка, анализ и доработка текста.

Зайнуллин Р.Х. – подготовка текста, анализ литературных данных;

Шайхетдинов Ф.Р. – подготовка текста, анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Contributions of the coauthors

Gabitov I.I. – scientific guidance, analysis and revision of the manuscript;

Negovora A.V. – preparation and analysis of literary data;

Farkhshatov M.N. – preparation of the manuscript, analysis of literary data;

Fayurshin A.F. – preparation of the manuscript, analysis of literary data, text editing;

Iofinov P.A. – preparation of the manuscript, analysis and revision of the text;

Zainullin R.H. – preparation of the manuscript, analysis of literary data;

Shaikhetdinov F.R. – preparation of the manuscript, analysis of literary data.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 18.12.2023

Статья принята к публикации 30.01.2024



## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ТОЛЩИНУ ФОРМИРУЕМОГО СЛОЯ



<sup>1,2</sup>Игорь Николаевич Кравченко, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru;

<sup>3</sup>Юрий Алексеевич Кузнецов, доктор технических наук, профессор;

<sup>4</sup>Наталья Сергеевна Баранова, старший преподаватель;

<sup>4</sup>Татьяна Николаевна Боровик, доцент

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,  
Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орел, Российская Федерация

<sup>4</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Данная работа финансировалась за счет средств федерального бюджета в рамках FFGU-2021-0003 и FFGU-2024-0024 по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования ЦКП ИМАШ РАН.

**Реферат.** Детали технологических машин, комплексов и оборудования, применяемых во многих отраслях промышленности, подвержены различным видам механического изнашивания, что приводит к значительному снижению их долговечности и увеличению расходов на содержание и эксплуатацию. Определили перспективные направления совершенствования технологий плазменного нанесения износостойких покрытий. Уделили особое внимание толщине функционального слоя, так как при использовании плазменных методов напыления она оказывает существенное влияние на качество покрытий. (Цель исследования) Разработать математические модели, позволяющие установить закономерности влияния технологических параметров плазменного нанесения износостойких покрытий на толщину формируемого функционального слоя. (Материалы и методы) Использовали для проведения экспериментальных исследований образцы, изготовленные из стали 45, на которые плазменным методом напыляли порошок на никелевой основе ПГ-СР4 (ПР-НХ17СР4). Приняли в качестве основных технологических режимов плазменного напыления покрытий силу тока дуги плазмотрона, дистанцию напыления и расход плазмообразующего газа. Толщину сформированных покрытий измеряли на стандартизированном оборудовании. Осуществляли статистическую обработку полученных значений толщины покрытий с использованием полного факторного эксперимента по методу Бокса-Уилсона. (Результаты и обсуждение). Разработали экспериментальную математическую модель технологического процесса плазменного нанесения покрытий и показали ее работоспособность. Описали критерии, используемые для оценки дисперсии экспериментов, адекватности и значимости полученных уравнений регрессии. С использованием программы Statistica дали графическую интерпретацию исследуемых зависимостей. (Выводы) На основе математического планирования эксперимента получили модели, позволяющие установить взаимосвязь между толщиной покрытия и заданными технологическими параметрами процесса плазменного напыления. Результаты анализа представленных аналитических зависимостей показали, что на толщину покрытия наибольшее влияние оказывает сила тока дуги плазмотрона.

**Ключевые слова:** дистанция напыления, износостойкие покрытия, плазменное напыление, плазмообразующий газ, толщина функционального слоя.

**Для цитирования:** Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А., Баранова Н.С., Боровик Т.Н. Оценка влияния технологических режимов плазменного нанесения покрытий на толщину формируемого слоя // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 44-50. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-44-50. EDN: GRZDFK.



**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES OF PLASMA COATING ON THE THICKNESS  
OF THE LAYER FORMED**<sup>1,2</sup>Igor N. Kravchenko, Dr.Sc.(Eng.), professor;<sup>3</sup>Yuriy A. Kuznetsov, Dr.Sc.(Eng.), professor;<sup>4</sup>Natal'ya S. Baranova, senior lecturer;<sup>4</sup>Tat'yana N. Borovik, assistant professor<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation<sup>2</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
Moscow, Russian Federation<sup>3</sup>Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation<sup>4</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

This work was funded from the federal budget within the framework of FFGU-2021-0003 and FFGU-2024-0024 based on the results of studies performed using the equipment of the Central Research Center of the IMASH RAS.

**Abstract.** Parts of technological machines, complexes and equipment used in many industries are subject to various types of mechanical wear, which leads to a significant decrease in their durability and an increase in maintenance and operating costs. Promising directions for improving the technologies of plasma application of wear-resistant coatings have been identified. Special attention was paid to the thickness of the functional layer, since when using plasma spraying methods, it has a significant impact on the quality of coatings. (Research purpose) The research purpose is developing mathematical models that make it possible to study the influence of the technological parameters of the plasma application of wear-resistant coatings on the thickness of the functional layer being formed. (Materials and methods) Samples made of 45 steel were used for experimental studies, on which a nickel-based powder PG-CP4 (PR-NH17CP4) was sprayed by plasma method. The current strength of the plasma torch arc, the spraying distance and the consumption of plasma-forming gas were adopted as the main technological modes of plasma spraying of coatings. The thickness of the formed coatings was measured on standardized equipment. Statistical processing of the obtained coating thickness values was carried out using a complete factor experiment using the Box-Wilson method. (Results and discussion). We have developed an experimental mathematical model of the technological process of plasma coating and demonstrated its operability. The criteria used to evaluate the variance of experiments, the adequacy and significance of the obtained regression equations are described. Using the Statistica program, a graphical interpretation of the studied dependencies was given. (Conclusions) Based on the mathematical planning of the experiment, models were obtained that make it possible to establish the relationship between the coating thickness and the specified technological parameters of the plasma spraying process. The results of the analysis of the presented analytical dependencies showed that the thickness of the coating is most influenced by the current strength of the plasma torch arc.

**Keywords:** spraying distance, wear-resistant coatings, plasma spraying, plasma-forming gas, thickness of the functional layer.

**For citation:** Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Baranova N.S., Borovik T.N. Influence of technological modes of plasma coating on the thickness of the layer formed. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 44-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-44-50. EDN: GRZDFK.

За последние десятилетия технологии производства, ремонта и восстановления современной техники развиваются достаточно быстро [1].

Однако очевидно, что промышленность не может обеспечить высокое качество деталей машин

при минимальной стоимости без применения наиболее эффективных и экономически выгодных технологических методов [2].

В большинстве случаев современные машины работают в тяжелых условиях, контактируя с вы-

сокотемпературными газовыми потоками, агрессивными средами и абразивными веществами, которые приводят к быстрому износу и коррозии рабочих поверхностей. Поэтому требуется применение перспективных методов и технологий, обеспечивающих повышение износостойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости и других эксплуатационных свойств изделий [3].

Для увеличения срока службы деталей машин можно использовать защитные функциональные покрытия, которые наносятся на их поверхности [4].

При этом существует множество способов нанесения покрытий, включая химические, гальванические и физические. Однако особенно высокоэффективными являются газотермические методы [5].

Это связано с высокой производительностью, низкой стоимостью нанесения покрытий, экологической чистотой процессов и возможностью обработки деталей самых разнообразных конфигураций и размеров. В результате чего плазменные технологии нашли достаточно широкое применение во многих областях промышленности и техники [6].

На сегодняшний день восстановление изношенных деталей машин служит важным направлением импортозамещения в агропромышленном комплексе, при этом восстановленные детали значительно дешевле, чем новые и имеют сравнительно большой ресурс [7].

Многие специализированные предприятия технического сервиса занимаются продвижением и развитием технологий восстановления изношенных деталей машин; открываются новые лаборатории на базе научно-исследовательских центров, где производится разработка инновационных высокоэффективных технологий, направленных на внедрение новых материалов, улучшение качества покрытий и экологических характеристик процессов их нанесения [8].

С использованием современного оборудования плазменное напыление представляет собой наиболее эффективный способ при ремонте и защите деталей [9].

В настоящее время многие проблемы технологий изготовления изделий и ремонта изнашиваемых деталей успешно решаются в различных областях промышленности, например, в машиностроении, автомобильной и сельскохозяйственной технике, легкой промышленности, городском и жилищно-коммунальном хозяйстве, энергетике и др.

Отечественные предприятия в рамках государственной программы импортозамещения с целью улучшения качества продукции все чаще применяют современные газотермические методы нане-

сения защитных покрытий [10]. Однако для создания эффективного производства необходимо упорядочить информацию и использовать научно-обоснованный подход при разработке и внедрении покрытий в промышленности, выбирая соответствующие технологии, оборудование и материалы. Поэтому становится очевидной необходимость разработки математических моделей, которые позволят оценить применение конкретных методов нанесения износостойких покрытий [11].

**Цель исследования** – разработать математические модели, позволяющие установить закономерности влияния технологических параметров плазменного нанесения износостойких покрытий на толщину формируемого функционального слоя.

**Материалы и методы.** Исследования проводили на образцах  $8 \times 120 \times 140$  мм, выполненных из Ст. 45. В качестве материала для плазменного напыления использовали порошок на никелевой основе ПГ-СР4 (ПР-НХ17СР4) в соответствии с ГОСТ 21448-75. Устанавливали основные технологические режимы плазменного нанесения покрытий в следующих пределах: сила тока дуги плазмотрона  $I = 170-200$  А; дистанция напыления  $L = 2,5-3,1$  см; расход плазмообразующего газа  $Q = 22-34$  л/мин. Толщину измеряли на стандартизированном оборудовании с использованием микроскопа *Axiocvert 40 MAT* [12].

После завершения процесса напыления производили статистическую обработку полученных значений толщины покрытия с применением полного факторного эксперимента (ПФЭ), одним из модификаций которого является метод Бокса-Уилсона [13].

Данный метод включает математическое описание процесса и построение матрицы планирования, проведение эксперимента в соответствии с планом, уточнение математического описания путем проверки статистической значимости выборок коэффициентов, а также оценку адекватности математической модели и сопоставление полученных результатов.

Для достижения поставленной цели необходимо оценить влияние технологических факторов и режимов на толщину функционального слоя. Для планирования эксперимента применяли ПФЭ  $2^3$ , поскольку рассматривали влияние трех факторов на толщину покрытия  $h$  [14].

При этом центр эксперимента соответствует нулевому уровню (основной уровень), а следующие уровни определяются с помощью интервалов варьирования (*табл. 1*). Опыты плана проводили при сочетании величин исследуемых факторов на

двух уровнях. Схему плана трехфакторного эксперимента представили в *таблице 2*. Факторы планирования эксперимента (силу тока дуги плазматрона  $I$ , дистанцию напыления  $L$  и расход транспортирующего газа  $Q$ ) устанавливали в качестве независимых переменных  $X_1, X_2, X_3$ , а толщину покрытия  $h$  – зависимой  $y$ . В каждой точке проводили по три измерения толщины покрытия и затем рассчитывали среднее значение (*табл. 3*). Цель проводимых экспериментов заключалась в достижении оптимальных свойств покрытия (толщины) при заданных технологических режимах плазменного напыления.

Наименование фактора	Основной уровень	Интервал варьирования
Сила тока дуги плазматрона $I(X_1)$ , А	185,0	15,0
Дистанция напыления $L(X_2)$ , см	2,8	0,3
Расход транспортирующего газа $Q(X_3)$ , л/мин	28,0	8,0

Номер точки	Факторы		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1
3	1	-1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	-1	1	1
7	1	-1	1
8	1	1	1

Номер точки	Толщина $h$ , мкм			
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{сред}$
1	37	36	38	37
2	39	37	38	38
3	37	33	35	35
4	45	46	41	44
5	45	46	44	45
6	34	33	38	35
7	45	47	49	47
8	34	36	35	35

**Результаты и обсуждение.** Результаты полученных экспериментальных данных проанализировали с использованием критерия Кохрена, который используется для оценки дисперсии. Значение критерия, полученное в расчетах ( $k_{рас} = 0,27$ ), сравнивали с табличным значением ( $k_{таб} = 0,51$ ) при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , числе степеней свободы 2 и количестве наблюдений 8. Поскольку табличное значение оказалось больше расчетного  $k_{таб} > k_{рас}$ , можно заключить, что все опыты воспроизводимы.

Затем проводили проверку статистической значимости коэффициентов в уравнении регрессии. Далее рассчитывали дисперсию воспроизводимости среднего значения, которая составила  $S^2_{усред} = 1,08$  при 16 степенях свободы. Далее определяли критерий Стьюдента с установленным уровнем значимости и степенями свободы.

Результаты расчета показали, что критерий Стьюдента составляет  $T_c = 2,12$ , а доверительный интервал  $-\varepsilon(b_i) = 0,78$ . После математической обработки получили математическую модель процесса:

$$y = 39,5 + 0,75X_1 - 1,5X_2 + X_3 + 0,75X_1X_2 - 0,25X_1X_3 - 4X_2X_3 - 1,25X_1X_2X_3. \quad (1)$$

После отбрасывания незначимых коэффициентов уравнения (1), обозначения факторов и исследуемых технологических параметров запишем зависимость в натуральных величинах:

$$h = 39,5 + 0,75I - 1,5L + Q - 4LQ - 1,25ILQ. \quad (2)$$

Используя критерий Фишера, данное уравнение проверили на адекватность [15].

Затем рассчитали дисперсию адекватности, которая составила 2,5; определили табличное значение критерия Фишера  $F_{кр} = 3,63$  для уровня значимости 0,05 с числом степеней свободы  $f_1 = 8$ , а также расчетное значение критерия Фишера  $F_{рас} = 2,308$ . Так как  $F_{рас} < F_{кр}$ , то уравнение (2) является значимым, адекватно описывающим полученные данные.

Следует помнить, что оптимальной математической моделью служит уравнение регрессии только в том случае, если доказана его работоспособность в центре плана. Для описания внутренней области изучаемого факторного пространства провели проверку оценки выхода процесса в центральной точке эксперимента  $|Y_{0сред} - b_0|$  с доверительной ошибкой разности между среднеарифметической оценкой дополнительного опыта в центре эксперимента и свободным членом  $\varepsilon(Y_{0сред} - b_0)$ .

Если  $\varepsilon (Y_{0\text{сред}} - b_0) > |Y_{0\text{сред}} - b_0|$ , то уравнение (2) удовлетворительно характеризует внутреннюю область изучаемого факторного пространства. На основании проведенной оценки описания уравнением внутренней области изучаемого факторного пространства установлено, что условие выполняется. Следовательно, полученное уравнение можно считать оптимальной математической моделью. С использованием программы *Statistica* построили графики экспериментальных зависимостей толщины покрытия при фиксации третьего фактора на среднем уровне (рис. 1) [16].

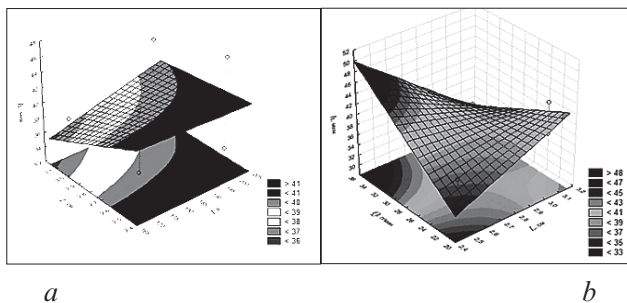


Рис. 1. Графическая интерпретация исследуемых зависимостей (фрагмент): а – толщины покрытий от силы тока и дистанции напыления; б – толщины покрытий от дистанции напыления и расхода плазмообразующего газа

Fig. 1. Graphical interpretation of the dependencies studied (fragment): а – coating thickness on current value and spraying distance; б – coating thickness on spraying distance and plasma gas flow rate

Математическая модель (2) имеет ограничения в точности описания зависимостей и может быть неверной за пределами указанных диапазонов факторов. Поэтому для получения более точной модели влияния технологических режимов на толщину покрытия воспользовались планом второго порядка. Данный план позволил получить полное квадратичное уравнение (полином второй степени), которое определяет оптимальные условия функционирования процесса на заключительном этапе исследования.

Составили план второго порядка – центральный композиционный ротatable план и представили полученные результаты в таблице 4. Критерий Кохрена (расчетный) – 0,14, табличный – 0,27. Следовательно, опыты и процесс воспроизводимы (уровень значимости  $\alpha = 0,05$ , число степеней свободы 2, количество наблюдений 20).

Критерий Стьюдента с установленным уровнем значимости и числом степеней свободы равен 2,02, а дисперсия воспроизводимости среднего значения –  $S^2_{\text{усред}} = 4,5$ .

Таблица 4

Table 4

Композиционный план второго порядка и результаты экспериментов  
Second-order compositional plan and experimental results

Номер опыта	Содержание компонентов в экспериментальных точках			Полученные данные			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{\text{сред}}$
1	-1	-1	-1	37	36	38	37
2	-1	1	-1	39	37	38	38
3	1	-1	-1	37	33	35	35
4	1	1	-1	45	46	41	44
5	-1	-1	1	45	46	44	45
6	-1	1	1	34	33	38	35
7	1	-1	1	45	47	49	47
8	1	1	1	34	36	35	35
9	-1,681792831	0	0	34	32	36	34
10	1,681792831	0	0	41	45	40	42
11	0	-1,681792831	0	38	34	39	37
12	0	1,681792831	0	36	37	35	36
13	0	0	-1,681792831	40	38	42	40
14	0	0	1,681792831	38	37	42	39
15	0	0	0	41	41	38	40
16	0	0	0	48	46	41	45
17	0	0	0	43	43	46	44
18	0	0	0	45	46	41	44
19	0	0	0	42	44	43	43
20	0	0	0	42	47	46	45

Получили следующую математическую модель:

$$y = 43,44 + 1,42X_1 - 1X_2 + 0,46X_3 + 0,75X_1X_2 - 0,25X_1X_3 - 4X_2X_3 - 1,56X_1^2 - 2,09X_2^2 - 1,03X_3^2 \quad (3)$$

С учетом отсеивания незначимых коэффициентов, обозначений факторов и исследуемых технологических параметров представили уравнение (3) в натуральных величинах:

$$h = 43,44 + 1,42I - L + 0,46Q - 4LQ - 1,56I^2 - 2,09L^2 - 1,03Q^2 \quad (4)$$

Дисперсия адекватности  $S^2_{ad} = 5,4$ . Критерий Фишера  $F_{\text{рас}} = 1,20$ , при этом  $F_{\text{кр}} = 1,84$  ( $F_{\text{рас}} < F_{\text{кр}}$ ). Следовательно, квадратичное уравнение регрессии (4) адекватно описывает полученные экспериментальные данные.

Графическую интерпретацию исследуемых зависимостей полученного регрессионного уравнения представили на рисунке 2.

При этом значение третьего фактора находится на среднем уровне.



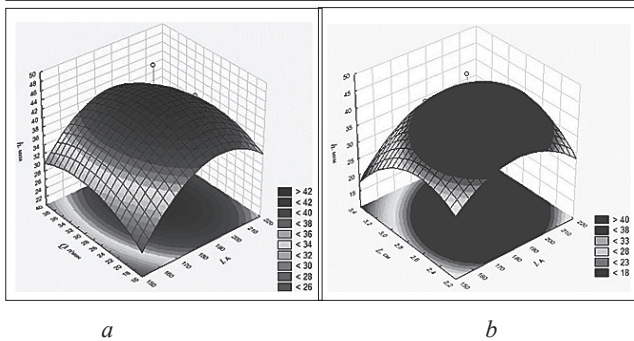


Рис. 2. Графическая интерпретация исследуемых зависимостей (фрагмент): а – толщины покрытий от силы тока и расхода плазмообразующего газа; б – толщины покрытий от силы тока и дистанции напыления

Fig. 2. Graphical interpretation of the researched dependencies (fragment): a – coating thickness on the current value and flow rate of the plasma-forming gas; b – coating thickness on the current value and the spraying distance

**Выводы.** В результате проведенных исследований на основании математического моделирования получили аналитические зависимости толщины покрытия от заданных технологических параметров процесса плазменного напыления. Применение разработанных математических моделей позволяет установить, что на толщину покрытия значительное влияние оказывает сила тока дуги плазмотрона. В дальнейшем планируется разработать модели влияния рассмотренных факторов на адгезионную прочность плазменных покрытий как важного эксплуатационного фактора.

### Библиографический список

- Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. N8. С. 701-704. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704.
- Никитин Г.А., Алексашина О.В., Гринюк О.Н. Контроль качества продукции в машиностроительном производстве с использованием современных цифровых технологий // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. N4. С. 38-44. EDN: VQNCCHG.
- Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В. и др. Концептуальные основы создания современных технологий наплавки покрытий // Транспортное машиностроение. 2022. N6(6). С. 48-61. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-6-48-61.
- Козлов И.А., Фомина М.А., Демин С.А. и др. Тенденции развития порошковых материалов для нанесения защитных и функциональных покрытий методом ХГН // Труды ВИАМ. 2023. N8(126). С. 100-112. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112.

- Кадырметов А.М., Симонова Ю.Э. Особенности применения газотермических и плазменных методов для получения функциональных покрытий // Воронежский научно-технический вестник. 2022. Т. 1. N1(35). С. 25-32. DOI: 10.34220/2311-8873-2022-25-32.

- Кравченко И.Н., Коломейченко А.В., Богачев Б.А. и др. Совершенствование плазменных методов нанесения покрытий в процессах восстановления и упрочнения деталей перерабатывающего оборудования // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. N2(22). С. 49-59. EDN: ETRKIV.

- Лялякин В.П. Восстановление деталей машин – важное направление импортозамещения в агропромышленном комплексе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. N9. С. 3-5. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-9-3-5.

- Ou Y.X., Wang H.Q., Ouyang X., et al. Recent advances and strategies for high-performance coatings. *Progress in Materials Science*. 2023. Vol. 136. 101125. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101125.

- Щицын Ю.Д., Белинин Д.С., Ольшанская Т.В. и др. Перспективы применения плазменной металлизации для аддитивного формирования заготовок изделий из различных групп материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2022. Т. 24. N4. С. 56-66. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.4.07.

- Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. N10(116). С. 100-115. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.

- Kravchenko I., Kuznetsov Yu., Velichko Yu., et al. Model for evaluating the plasma coating method. *Advanced Engineering Letters*. 2023. Vol. 2. N1. 21-27. DOI: 10.46793/adeletters.2023.2.1.4.

- Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю. Толщина покрытия детали при плазменном напылении // Современные материалы, техника и технологии. 2018. N1(16). С. 77-82. EDN: YQEAGI.

- Eshbaev U., Nishonov A., Saodato A. Development of mathematical models of print quality by Box-Wilson. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 304. 03023. DOI: 10.1051/e3sconf/202130403023.

- Тимофеева Н.Е. Автоматизированная система построения методов планирования эксперимента: простого, ортогонального, ротатабельного // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2019. N2. С. 1-7. DOI: 10.15827/2311-6749.31.356.

- Бессонов А.С. Методология исследования и планирование эксперимента // Перспективы науки. 2019. N4(115). С. 63-65. EDN: LNSIWK.

- Конюхов В.Г. Особенности формирования исход-

ных данных в пакете STATISTICA // Научный аспект. 2021. Т. 6. №1. С. 720-723. EDN: LRGUWL.

### References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Production and repair of domestic machines for the agro-industrial complex from the position of the 5M principle // *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2023. N8. 701-704 (In Russian). DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704.
2. Nikitin G.A., Aleksashina O.V., Grinyuk O.N. Product quality control in machine-building production using modern digital technologies. *Journal of Technical Research*. 2022. Vol. 8. N4. 38-44 (In Russian). EDN: VQNCHEG.
3. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., et al. Conceptual foundations for developing modern coating surfacing technologies. *Transport Engineering*. 2022. N6(6). 48-61 (In Russian). DOI: 10.30987/2782-5957-2022-6-48-61.
4. Kozlov I.A., Fomina M.A., Demin S.A., et al. Tendencies in the development of powder materials for the application of protective and functional coatings by the CGN method. *Trudy VIAM*. 2023. N8(126). 100-112 (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-100-112.
5. Kadyrmetov A.M., Simonova Yu.E. Features of application of gas-thermal and plasma methods for obtaining functional coatings. *Voronezh scientific and technical bulletin*. 2022. Vol. 1. N1(35). 25-32 (In Russian). DOI: 10.34220/2311-8873-2022-25-32.
6. Kravchenko I.N., Kolomeichenko A.V., Bogachev B.A., et al. Improving of plasma coating methods in the processes of reconditioning and hardening of agroindustrial processing equipment parts. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*. 2019. N2(22). 49-59 (In Russian). EDN: ETRKIV.
7. Lyalyakin V.P. Restoration of machine parts is important direction of import substitution in agro-industrial complex. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya*. 2019. N9. 3-5 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-9-3-5.
8. Ou Y.X., Wang H.Q., Ouyang X., et al. Recent advances and strategies for high-performance coatings. *Progress in Materials Science*. 2023. Vol. 136. 101125. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101125.
9. Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Olshanskaya T.V., et al. Prospects for the application of plasma metallization for the additive formation of workpieces of products from various groups of materials. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022. Vol. 24. N4. 56-66 (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9877/2022.4.07.
10. Druzhnova Y.S. Development of methods for thermal spraying of hardening tires based on tungsten and chromium carbides (review). *Trudy VIAM*. 2022. N10(116). 100-115 (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.

11. Kravchenko I., Kuznetsov Yu., Velichko Yu., et al. Model for evaluating the plasma coating method. *Advanced Engineering Letters*. 2023. Vol. 2. N1. 21-27. DOI: 10.46793/adeletters.2023.2.1.4.

12. Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu. The thickness of the coating parts in plasma spraying. *Modern materials, engineering and technology*. 2018. N1(16). 77-82 (In Russian). EDN: YQEAGI.

13. Eshbaev U., Nishonov A., Saodato A. Development of mathematical models of print quality by Box-Wilson. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 304. 03023. DOI: 10.1051/e3sconf/202130403023.

14. Timofeeva N.E. Automated system for constructing experimental planning methods: simple, orthogonal, rotatable. *Software products, systems and algorithms*. 2019. N2. 1-7 (In Russian). DOI: 10.15827/2311-6749.31.356.

15. Bessonov A.S. Research methodology and design of experiments. *Perspectives of science*. 2019. N4(115). 63-65 (In Russian). EDN: LNSIWK.

16. Konyukhov V.G. Features of the formation of initial data in the STATISTICA package. *Scientific aspect*. 2021. Vol. 6. N1. 720-723 (In Russian). EDN: LRGUWL.

### Заявленный вклад соавторов

Кравченко И.Н. – научное руководство, формулирование основной концепции исследования;

Кузнецов Ю.А. – разработка программы исследований, поиск аналитических материалов;

Баранова Н.С. – сбор и обработка материалов, подготовка литературных данных;

Боровик Т.Н. – осуществление критического анализа, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Contributions of the coauthors

Kravchenko I.N. – scientific leadership, formulation of the main research concept;

Kuznetsov Yu.A. – research program development, search for analytical materials;

Baranova N.S. – collection and processing of materials preparation of literature data;

Borovik T.N. – development of a research program, revision of the text.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023

Статья принята к публикации 26.01.2024

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Владимир Евгеньевич Архипов, кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник, e-mail: vearkhipov@mail.ru;  
Геннадий Викторович Москвитин, доктор технических наук, профессор;  
Максим Сергеевич Пугачев, научный сотрудник*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва, Российская Федерация*

**Реферат.** Предварительные исследования медных и медно-цинковых покрытий, полученных газодинамическим напылением, показали высокие механические и трибологические свойства формируемых функциональных поверхностей. Влияние режимов напыления и последующей термической обработки на медно-цинковые газодинамические покрытия мало изучено. (Цель исследования) Исследовать влияние технологических режимов напыления, а также последующей термической обработки покрытия на его фазовый состав, структуру и свойства. (Материалы и методы) Наносили покрытие с помощью газодинамической установки фирмы «Димет» с различным перекрытием напыляемых слоев и последующей термической обработкой полученного покрытия при разных температурах и времени выдержки. Структуру покрытия исследовали на рентгеновском дифрактометре и спектрометре. Определяли когезионные свойства на разрывной испытательной машине методом «кольцевого отрыва», трибологические – на стенде МТ-8 при возвратно-поступательном скольжении плоских сопрягаемых тел. (Результаты и обсуждение) Определили, что по химическому и фазовому составу медно-цинковое покрытие, нанесенное при смещении сопла на два миллиметра и температуре потока воздуха 450 градусов Цельсия, после термической обработки в диапазоне температур 420-430 градусов Цельсия и времени выдержки 180 минут соответствует двухфазной латуни типа Л65. Исследование параметров решетки меди показывает, что уже после выдержки в печи в течение 60 минут формируется двухфазная структура на основе твердых растворов цинка в меди с разным содержанием меди и твердого раствора электронного типа на базе CuZn. (Выводы) Трибологические испытания медно-цинкового покрытия в среде индустриального масла И-20А позволили выявить наличие взаимного массопереноса меди и цинка с покрытия на контртело и обратно, что сопровождается эффектом безызносности при нагрузке до 10 мегапаскалей. Когезионная прочность медно-цинкового покрытия зависит от времени термической обработки (фазового состава) и после 60 минут выдержки превышает исходные показатели (примерно 78 мегапаскалей) и достигает примерно 93 мегапаскалей.

**Ключевые слова:** газодинамическое напыление, медно-цинковое покрытие, фазовый состав, трение, интенсивность изнашивания, когезионная прочность, термическая обработка, микрорельеф.

**Для цитирования:** Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Восстановление изношенных поверхностей трения скольжения газодинамическим напылением медно-цинковых покрытий // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 51-59. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-51-59. EDN: DJJVTY.

Scientific article

**RESTORATION OF WORN SLIDING FRICTION SURFACES BY GAS-DYNAMIC SPRAYING  
OF COPPER-ZINC COATINGS**

*Vladimir E. Arkhipov, Ph.D.(Eng.), leading researcher;  
Gennadiy V. Moskvitin, Dr.Sc.(Eng.), professor;  
Maksim S. Pugachev, researcher*



*Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravova  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** Preliminary studies of copper and copper-zinc coatings obtained by gas-dynamic spraying have shown high mechanical and tribological properties of the formed functional surfaces. The influence of the modes of spraying and subsequent heat treatment on copper-zinc gas dynamic coatings has been little studied. (Research purpose) The research purpose is investigating the effect of technological modes of spraying, as well as subsequent heat treatment of the coating on its phase composition, structure and properties. (Materials and methods) The coating was applied using a Dimet gas dynamic installation with different overlap of the sprayed layers and subsequent heat treatment of the resulting coating at different temperatures and exposure times. The structure of the coating was studied using an X-ray diffractometer and a spectrometer. Cohesive properties were determined on a bursting testing machine by the "ring separation" method, tribological properties were determined on the MT-8 stand during reciprocating sliding of flat mating bodies. (Results and discussion) It was determined that the chemical and phase composition of the copper-zinc coating applied with a displacement of the nozzle by two millimeters and an air flow temperature of 450 degrees Celsius, after heat treatment in the temperature range of 420-430 degrees Celsius and a holding time of 180 minutes corresponds to two-phase brass type L65. The study of the parameters of the copper lattice shows that after exposure in the furnace for 60 minutes, a two-phase structure is formed based on solid solutions of zinc in copper with different copper content and an electronic-type solid solution based on CuZn. (Conclusions) Tribological tests of the copper-zinc coating in the I-20A industrial oil medium revealed the presence of mutual mass transfer of copper and zinc from the coating to the counterbody and vice versa, which is accompanied by a wear-free effect at a load of up to 10 megapascals. The cohesive strength of the copper-zinc coating depends on the time of heat treatment (phase composition) and after 60 minutes of exposure exceeds the initial values (approximately 78 megapascals) and reaches approximately 93 megapascals.

**Keywords:** Gas-dynamic spraying, copper-zinc coating, phase composition, friction, wear intensity, cohesive strength, heat treatment, microrelief.

**For citation:** Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. Restoration of worn sliding friction surfaces by gas-dynamic spraying of copper-zinc coatings. *Machinery technical service*. 2024. Vol. 62. N1. 51-59 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-51-59. EDN: DJJVTY.

Газодинамическое напыление позволяет наносить на поверхность разнообразные функциональные покрытия толщиной до 1 мм и более без значительного нагрева подложки ( $\leq 150^\circ\text{C}$ ), что обеспечивает сохранение механических свойств материала подложки и отсутствие деформации. Перед нанесением покрытия не всегда возникает необходимость проводить очистку поверхности от нестойких загрязнений, так как наносимая порошковая смесь содержит кроме частиц металлов (Cu, Zn, Al, Ni и т. д.) частицы оксида алюминия (корунда), которые активируют и очищают поверхность. Если поверхность нуждается в устранении стойких загрязнений, то в установке, например, модели «Димет-404» имеются два бункера, один из которых содержит корунд, а другой смесь порошков для напыления. Поэтому нанесение слоя металла на изношенную поверхность проводится на одной установке без изменения положения детали, поверхность которой локально или целиком очищается корундом (бункер №1), а затем за счет пере-

ключения на подачу наносимой смеси порошков (бункер №2) проводится нанесение покрытия. Адгезия наносимого покрытия к подложке зависит от механических свойств наносимого металла и предварительной подготовки поверхности и составляет, например, для меди  $\approx 50$  МПа при когезионной прочности до 100 МПа.

Нанесение покрытий разного функционального назначения делает метод холодного газодинамического напыления весьма перспективным для восстановления поверхностей деталей машин и агрегатов, износ которых, как правило, не превышает 1 мм и имеет локальный характер [1].

В передовых странах Америки, Европы и Азии применение ГДН затрагивает различные области аэрокосмической, энергетической, морской, химической и нефтегазовой промышленности [2].

Область рассматриваемых конкретных изделий достаточно широка и касается изготовления и ремонта подшипников и пластин скольжения, судовых винтов, лопаток морских турбин и рулей,



изделий в силовой электронике и радиаторах с контактными ребрами. Исследуется влияние технологических параметров напыления, состава порошковых смесей, последующей и предварительной термической обработки при восстановлении деталей, подвергнутых циклической кавитации и нагрузкам и электрохимической коррозии [3].

Значительное внимание уделяется улучшению структуры и адгезионных свойств покрытий, включая использование мультиармированных углеродными наноструктурами и керамическими микрочастицами порошковых смесей для восстановления изделий из алюминиевых сплавов [4].

При исследовании покрытий на основе смеси частиц меди, цинка и корунда, нанесенных с использованием температуры потока воздуха в диапазоне 270-450 °С было выявлено наличие диффузии меди в цинк с формированием покрытия на основе меди, цинка и твердых растворов электронного типа на базе  $CuZn_3$  ( $\epsilon$ -фазы) и  $Cu_5Zn_8$  ( $\epsilon$ -фазы), характерных для сплавов медь – цинк (латуней) [5].

Твердость основных фаз составляет: медь  $\approx 106 HV$ , цинк  $\approx 49 HV$  и твердые растворы электронного типа на базе  $CuZn_3$  и  $Cu_5Zn_8 \approx 170 HV$  и так как процесс формирования фаз, присущих латуням, проходит локально на базе частиц цинка, то в результате медно-цинковое покрытие имеет градиентную по твердости и фазовому составу структуру, что может обеспечить ему хорошие триботехнические свойства. Однако покрытия, наносимые с использованием механической смеси частиц металлов и корунда, содержат оксид алюминия, массовая доля которого зависит от используемых металлов и режимов напыления и находится в диапазоне  $\leq 1-5\%$ , что может оказывать влияние на износ сопряженной поверхности и пары трения в целом.

Пара трения сталь ШХ15–сталь ШХ15 с покрытием медью, напыленным при 450 °С, испытывалась в условиях реверсивного трения скольжения при давлении до 10 МПа. Показано, что сопряжение обладает высокой работоспособностью, износ предельно мал: интенсивность изнашивания покрытия составляет  $(1,1-1,5) \times 10^{-10}$  и контртела –  $(0,3-0,4) \times 10^{-11}$  в среде минерального масла И-20А; в пластичном смазочном материале Литол-24 интенсивность изнашивания покрытия и контртела составляют  $(2-5) \times 10^{-10}$  и  $0,2 \times 10^{-11}$  соответственно [6].

Сравнительный анализ результатов показал, что износ пары трения покрытие меди – сталь ШХ15 сопоставим с износом стали ШХ15 после азотирования в тлеющем разряде.

Исследование микрорельефа поверхности па-

ры трения по параметрам  $R_a$  и  $R_z$  выявило улучшение качества поверхности контртела на 1 класс с 10 до 11 и одновременно повышение качества поверхности покрытия с 9 до 10 класса. Исследователи данный результат обуславливают чисто механическим воздействием покрытия меди с включениями корунда, размер частиц которых менее 1 мкм на сопряженную поверхность («мягкое» шлифование).

Однако значение параметра  $R_t$  на некоторых этапах пути трения возрастает с  $1,486 \times 10^{-6}$  м до  $2,440 \times 10^{-6}$  м, что может быть свидетельством появления отдельных рисок от воздействия твердых частиц малого размера, которые могут находиться как в покрытии, так и между сопряженными поверхностями. Сравнительные испытания покрытия меди и медно-цинкового покрытия в условиях сухого трения в паре с образцом из коррозионностойкой жаропрочной высоколегированной стали аустенитного класса ЭП302 при удельном давлении до 10 МПа и времени испытания в течение 6 ч показали, что при нормальной температуре интенсивность изнашивания медно-цинкового покрытия более чем в три раза меньше, чем покрытия меди. У контртела в паре с покрытием меди износ существенный, а в паре с медно-цинковым покрытием в пределах точности измерения износ контртела выявить не удалось. Исследователи этот результат связывают с наличием эффекта массопереноса меди и цинка. При увеличении температуры испытания до 250 °С интенсивность изнашивания покрытия меди  $1,0 \times 10^{-8}$  в три раза ниже, чем интенсивность изнашивания медно-цинкового покрытия  $3,0-3,2 \times 10^{-8}$ . При этом интенсивность изнашивания образца – кольца в паре с покрытием меди ( $< 0,38 \times 10^{-8}$ ) практически на порядок меньше, чем при работе образца в паре с медно-цинковым покрытием, где интенсивность изнашивания составила  $1,2-3,7 \times 10^{-8}$ .

Изменение трибологических свойств медно-цинкового покрытия при повышении температуры испытания до 250 °С (6 ч) связано с процессами диффузии (взаимодиффузии) в нанесенном слое металла и изменением структуры, фазового состава и свойств покрытия.

Предварительные результаты испытания покрытия меди и медно-цинкового покрытия показывают возможность использования технологии газодинамического напыления для восстановления изношенных поверхностей трения. Нужно иметь в виду, что в процессе взаимодействия сопряженных пар трения скольжения возникают кон-

тактные напряжения и микродеформации, которые сопровождаются диффузией (взаимодиффузией) компонентов, как, впрочем, и нагрев, что может приводить к изменению фазового состава и структуры покрытия в процессе работы. Поэтому возникает необходимость проведения исследований влияния этих факторов на структуру и свойства покрытия и трибологические свойства поверхности.

**Цель исследования** – исследовать влияние параметров напыления и последующей температуры и времени термической обработки на фазовый состав, структуру и свойства медно-цинкового покрытия.

**Материалы и методы.** Покрытие на подложку из стали 40X напыляли с использованием газодинамической установки «Димет-404» при скорости перемещения сменного сопла относительно поверхности образца 10 мм/с, расстоянии от среза сопла до поверхности 10 мм и температуре потока воздуха 450 °С. Для напыления применяли готовую смесь частиц металлов и химического соединения в состоянии поставки. Соотношение ингредиентов в смеси составляло, %:  $Cu : Zn : Al_2O_3 = 35 : 35 : 30$  (марка С-01-11) [7].

Нанесение покрытия осуществляли в двух вариантах, а именно при смещении сопла на 3 мм, при котором перекрытие следующим слоем металла предыдущего составляет 64% ( $K_{пер} \approx 64\%$  – вариант 1), и 2 мм ( $K_{пер} 55\%$  – вариант 2) при двух проходах сопла над поверхностью образца (толщина слоя). Последующую термическую обработку проводили в печи по режимам: выдержка в интервале температур 410-420°С (вариант 1) и 420-430°С (вариант 2) в течение 3, 5, 10, 20, 40, 60, 180 мин.

Фазовый состав покрытий системы  $Cu-Zn$  определяли на многофункциональном рентгеновском дифрактометре *Rigaku Ultima IV* в медном  $K_{\alpha}$ -излучении при параллельном пучке. Для формирования параллельного пучка использовали рентгеновскую оптику в виде многослойного параболического зеркала. Дифрактограммы снимали в симметричном режиме, диапазон сканирования  $2\theta = 20 - 120^\circ$ , шаг  $0,05^\circ$ , скорость детектора 3 град/мин.

Анализ дифрактограмм осуществляли на основе программного продукта *PDXL (Rigaku)* с использованием базы данных *PDF-2*. Количественный анализ проводили методом Ритвельда, реализованным в пакете программ *PDXL (Rigaku)*.

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре *Rigaku Primus II* в вакууме с

применением в качестве источника рентгеновского излучения рентгеновской трубки с  $Rh$ -анодом; диапазон элементов – от  $Ca$  до  $U$ . Количественный анализ выполняли после записи и расшифровки экспериментальных спектров от исследуемых образцов с помощью специального программного обеспечения фирмы *Rigaku ZSX* методом фундаментальных параметров *SQX* (без эталонных образцов).

Когезионную прочность медно-цинкового покрытия в исходном состоянии и после термической обработки исследовали методом «кольцевого отрыва». Для испытаний использовали универсальную сервогидравлическую испытательную машину фирмы *SHIMADZU*. Скорость перемещения активного захвата составляла 0,002 мм/с.

Когезионную прочность покрытия определяли как отношение предельной нагрузки, предшествующей разрушению покрытия, к площади нанесенного покрытия. Используя расчетные данные, строили зависимость величины когезионной прочности покрытия медь–цинк от времени термической обработки.

Триботехнические испытания пар сталь 40X с покрытием–сталь ШХ15 проводили на стенде МТ-8 при возвратно-поступательном скольжении плоских сопрягаемых тел. Выбор схемы трения обусловлен тем, что реверсивный вид движения пары трения относится к наиболее тяжелым и позволяет адекватно выявить преимущества или недостатки того или иного вида обработки конструкционных материалов. Величины интенсивности изнашивания  $I_h$  определяли по потере массы каждого из образцов пары, оценивали также суммарную интенсивность изнашивания покрытия  $I_{\Sigma}$ , отражающую его предельный износ и предельную работоспособность пары в целом.

**Результаты и обсуждение.** Рентгенофлуоресцентный анализ показал, что нанесенное покрытие состоит из 64,8%  $Cu$  и 35,0%  $Zn$ . В соответствии с диаграммой состояния  $Cu-Zn$  такому содержанию компонентов соответствует область существования твердого раствора цинка в меди ( $\alpha$ -фаза) и твердого раствора электронного типа на базе  $CuZn$  ( $\beta'$ -фаза), т. е. двойной латуни Л65.

Перед оценкой и интерпретацией результатов рентгеноструктурного анализа следует отметить, что основными факторами, влияющими на диффузию (взаимодиффузию) и формирование фазового состава наносимого слоя металла во время операции напыления, является деформация твердыми частицами корунда частиц меди, а также

температура и время процесса, которые зависят от смещения сопла относительно ранее нанесенного слоя *Кнер* и количества проходов сопла над поверхностью (толщины покрытия) [8].

Результаты рентгеноструктурного фазового анализа медно-цинкового покрытия, нанесенного при смещении сопла на 3 мм с последующей термической обработкой при температуре 410-420 °С и при смещении сопла на 2 мм с последующей термической обработкой при температуре 420-430 °С представлены в таблице 1.

Фазы и химические соединения		Массовая доля химических соединений и фаз, % вариант 1/ вариант 2							
		Время выдержки, мин							
		0	3	5	10	20	40	60	180
<i>Cu</i>		58/33	48/44	40/43	28/33	28/31	22/25	22/18	3/-
$\alpha$ -тв. р-р		-	1/-	15/20	18/39	19/42	33/48	40/67	64/84
<i>CuZn</i> ( $\beta'$ )		-	-	-/37	30/28	31/27	29/27	19/15	17/16
<i>Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub></i> ( $\gamma$ )		-/49	44/56	45/-	24/-	22/-	16/-	19/-	16/-
<i>Zn</i>		23/18	7/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
$\eta$ -фаза		19/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-

У медно-цинкового покрытия, нанесенного с меньшим временем напыления (*Кнер*  $\approx$  55%) диффузия меди в цинк позволяет сформироваться твердому раствору меди в цинке ( $\eta$ -фаза) с массовой долей 19% при наличии исходных компонентов меди и цинка с массовой долей 58 и 23% соответственно (табл. 1). У медно-цинкового покрытия, нанесенного с меньшим смещением сопла (2 мм) за счет более длительного процесса напыления, диффузия меди в цинк проходит более интенсивно, что позволяет сформироваться твердому раствору электронного типа на базе *Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>* ( $\gamma$ -фаза), с массовой долей 49% при наличии чистой меди и цинка, массовая доля которых составляет 33 и 18% соответственно (табл. 1).

На основе результатов рентгеноспектрально-го и рентгеноструктурного анализа показано существенное влияние на процесс структурно-фазовых превращений деформации частиц меди, формирования значительного количества точечных и протяженных дефектов (вакансий и дислокаций) и также измельчения субструктуры (областей когерентного рассеяния), которые, как показывают теоретические основы процессов диффузии, способствуют кооперированному смещению атомов

и прохождению межграницной диффузии и диффузии по вакансионному механизму и модифицированию частиц цинка атомами меди с формированием фаз, присущих латуням.

Термическая обработка медно-цинкового покрытия (*Кнер*  $\approx$  55%) при температуре ниже точки плавления цинка не позволяет за счет диффузии цинка в медь, даже при времени выдержки в течение 180 мин, получить фазовый состав, соответствующий двойным латуням, так как в них присутствует медь с массовой долей около 3%, что в сплавах меди с цинком (латунях) не должно наблюдаться.

В то же время у медно-цинкового покрытия, нанесенного с коэффициентом перекрытия 64%, термическая обработка при температуре выше точки плавления цинка (420-430 °С) и максимальном времени выдержки 180 мин сопровождается формированием структуры на основе двух фаз ( $\alpha$  и  $\beta'$ ), что соответствует двойным латуням. Поэтому можно однозначно сказать, что медно-цинковое покрытие, нанесенное при смещении сопла на два миллиметра при температуре потока воздуха 450 °С, после термической обработки при температуре в интервале 420-430 °С в течение 180 мин по химическому и фазовому составу соответствует двойной латуни Л65. Дополнительный анализ параметров решетки основных фаз медно-цинкового покрытия позволяет сделать некоторые уточнения по состоянию структуры (табл. 2).

Фазы		Период решетки, нм							
		Время выдержки, мин							
		0	3	5	10	20	40	60	180
Термическая обработка в диапазоне 410-420°С									
<i>Cu</i>		0,3615	0,3615	0,3614	0,3615	0,3615	0,3619	0,3622	0,3873
$\alpha$ -тв. р-р		-	0,3718	0,3679	0,3694	0,3696	0,3697	0,3697	0,3701
<i>CuZn</i> ( $\beta'$ )		-	-	-	0,2950	0,2951	0,2952	0,2952	0,2952
<i>Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub></i> ( $\gamma$ )		-	0,8887	0,8861	0,8860	0,8858	0,8850	0,8839	0,8880
Термическая обработка в диапазоне 420-430°С									
<i>Cu</i>		0,3615	0,3613	0,3613	0,3611	0,3622	0,3624	0,3633	-
$\alpha$ -тв. р-р		-	-	0,3695	0,3697	0,3699	0,3698	0,3687	0,3678
<i>CuZn</i> ( $\beta'$ )		-	-	0,2951	0,2951	0,2950	0,2955	0,2951	0,2983

Как видно из представленных результатов, после термической обработки покрытия в течение



180 мин при температуре 410-420 °С параметры решетки меди значительно отличаются от исходных, что можно считать как наличие еще одного твердого раствора цинка в меди. В таком случае это покрытие также следует отнести к латуням, только с учетом того, что это тройная латунь, у которой вместе с твердым раствор цинка в меди двух типов, то есть с разным содержанием меди и цинка присутствуют два твердых раствора электронного типа на базе  $CuZn$  ( $\beta'$ -фаза) и  $Cu_5Zn_8$  ( $\gamma$ -фаза) [9].

Таким же образом можно оценить состояние структуры медно-цинкового покрытия после термической обработки при температуре 420-430 °С. Как видно из представленных результатов, после термической обработки покрытия в течение 60 мин период решетки меди составляет 0,3633 нм и, если оценивать зависимость параметра решетки от содержания меди, то данный твердый раствор цинка в меди содержит  $\approx 90$  ат% меди. В литературе сплав с содержанием меди порядка 90 ат% носит название томпак – красная латунь, и в таком случае медно-цинковое покрытие после термической обработки в течение 60 мин следует также считать латуней с присутствием двух типов твердого раствора.

Когезионная прочность металла покрытия в исходном состоянии имеет величину 78 МПа, что несколько ниже, чем когезия покрытия меди (88 МПа) и цинка (95 МПа), нанесенного при аналогичной температуре напыления. Термическая обработка в течение 5 мин снижает когезию покрытия достаточно существенно до  $\approx 64,6$  МПа, что может быть связано с формированием  $\beta'$ -фазы, увеличение содержания которой значительно снижает прочность и пластичность латуней [10].

При увеличении времени термической обработки до 10 мин когезионная прочность металла покрытия повышается до  $\approx 75,4$  МПа и достигает практически исходной, что обусловлено увеличением массовой доли твердого раствора цинка в меди ( $\alpha$ -фазы) с 20 до 39% и уменьшением содержания твердого раствора электронного типа на базе  $CuZn$  ( $\beta'$ -фазы) с 37 до 28%. Дальнейшее повышение времени выдержки в печи до 20 мин сопровождается максимальным снижением когезии до уровня  $\approx 42,6$  МПа.

Увеличение времени термической обработки до 60 мин и более сопровождается повышением когезионной прочности медно-цинкового покрытия до величины более 90 МПа, что безусловно связано с увеличением массовой доли твердого раствора цинка в меди и снижением массовой доли хрупкой  $\beta'$ -фазы (рис. 1).

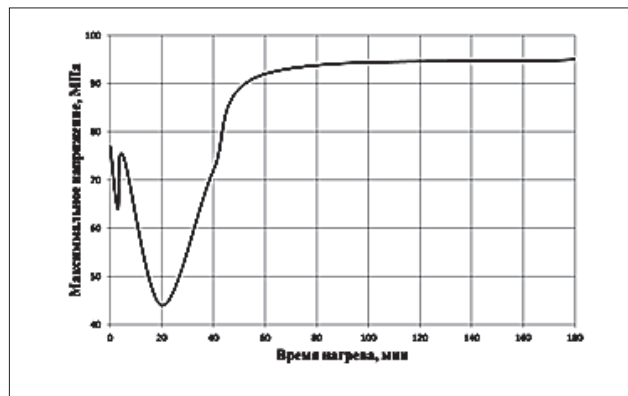


Рис. 1. Зависимость когезионной прочности покрытий на основе смеси частиц меди и цинка от времени термической обработки при температуре 420-430 °С

Fig. 1. Cohesive strength of coatings based on a mixture of copper and zinc particles on the time of heat treatment at a temperature of 420-430 °С

Исходя из полученных результатов металлофизических исследований и испытаний на когезионную прочность металла покрытия представляет интерес оценка трибологических свойств медно-цинковых покрытий в исходном состоянии, а также после термической обработки в течение 10, 60 и более минут. После термической обработки формируется градиентная по твердости структура (100-120 и 300-320 МПа), когезионная прочность не отличается от исходной, а при термической обработке в течение 60 мин и выше имеет более высокое значение. Поэтому для исследования трибологических свойств пары было выбрано медно-цинковое покрытие в исходном состоянии и после термической обработки в течение 10 мин.

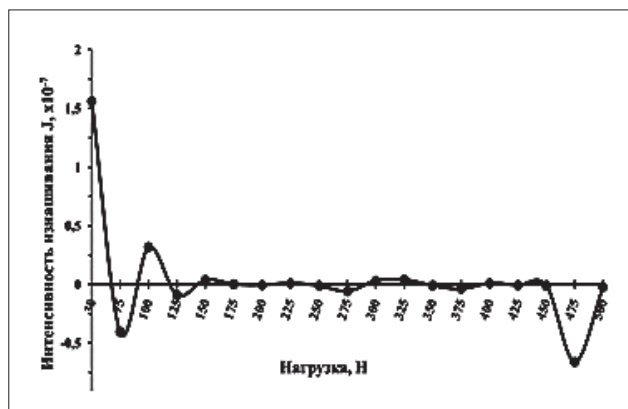
Экспериментальные данные величины износа стали 40Х с медно-цинковым покрытием и контртела из стали ШХ15 в процессе испытаний пары трения в неактивном жидком смазочном материале (индустриальное масло) при ступенчатом повышении внешнего давления привели на рисунке 2 [11].

Видно, что после небольшого пути трения при минимальной нагрузке наблюдается резкое уменьшение интенсивности изнашивания покрытия с  $1,0 \times 10^{-7}$  до нулевой отметки, а дальнейшее увеличение давления сопровождается частичным переносом медно-цинкового покрытия на сопряженное контртело. Этот процесс на основном образце (сталь 40Х) имеет выраженный волнообразный характер, его особенность состоит во взаимном переносе материала покрытия на контртело и наоборот. При повышенном давлении износ образца с покрытием практически приближается к нулю, а некоторое изменение на отдельных участках пу-



ти трения сопровождается частичным переносом покрытия на контртело.

Приведенные зависимости уровня поверхностного разрушения сопряжения от давления при трении дают основания полагать, что в основе механизма контактного взаимодействия стали с покрытием  $Cu-Zn-Al_2O_3$  со сталью ШХ15 лежит процесс массопереноса в зоне поверхностной пластической деформации, который минимизирует уровень поверхностного разрушения. Следует заметить, что износ сопряженного образца (контртела) при всех нагрузках не происходит: поверхность трения полностью защищена покрытием типа «латуни», сформировавшимся в результате массопереноса в зоне контакта и намазывания медного сплава на него.



a



b

Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки на образец: а – сталь 40X с покрытием типа «Латунь», нанесенным при температуре 450 °C; б – контртело сталь ШХ15  
Fig. 1. Dependence of wear rate on the load on the sample: а – 40X steel with a "Brass" coating applied at a temperature of 450 °C; б – counterbody steel ШХ15

Термическая обработка покрытия, изменяющая его структурно-фазовое состояние, усиливает нестабильность трения на начальных этапах испытаний, но в процессе повышения нагрузки уве-

личивается толщина сформированного покрытия на контробразце, предотвращая его разрушение.

При трении не происходит изменения класса чистоты обработки контртела; несколько снижаются микрогеометрические характеристики покрытия в пределах исходного класса чистоты обработки (табл. 3).

Как отмечалось выше, триботехнические испы-

Материал покрытия	Характеристики микрогеометрии поверхности					
	Исходное состояние		Класс чистоты	После трения		Класс чистоты
	$R_a$	$R_z$		$R_a$	$R_z$	
Контртело–сталь ШХ15						
Исходное покрытие	0,527	3,555	8-9	0,386	2,314	9-8
Покрытие после ТО	0,435	2,975	8-9	0,680	1,645	8-9
Основной образец–сталь 40X с покрытием						
Исходное покрытие	0,285	1,955	9	0,566	4,412	8
Покрытие после ТО	0,276	1,668	9	0,276	2,081	9

тания проводили в условиях ступенчатого повышения внешней нагрузки в диапазоне 30-500 Н. При этом покрытие (как в исходном состоянии, так и после термической обработки) практически не изнашивается в установившемся режиме трения и, более того, значение критического давления ( $P_{кр}$ , при котором появляются следы задиров) для указанного нагрузочного режима не достигается. Следовательно, полученные экспериментальные результаты дают основание предполагать, что исследуемое покрытие  $Cu-Zn$ , полученное методом газодинамического напыления, обладает способностью выдерживать существенно более высокие внешние давления, т. е. обладает высокой несущей способностью в условиях реверсивного трения скольжения.

Исходя из рассмотренной структуры покрытия – наличия и размера частиц корунда, рельефа поверхности, а также градиентного фазового состава и твердости можно предложить следующий механизм безызносности. Медное или медно-цинковое покрытие с включениями частичек корунда можно представить в виде абразивного инструмента. Твердые частицы корунда, вступая в контакт с поверхностью контртела, активируют поверхность (повышают энергию) и создают рельеф (твердые выступы), которые своими микро-

неровностями захватывают, переносят и удерживают микрочастицы меди и цинка на поверхности трения. Поэтому на начальном этапе приработки наблюдается снижение массы образца с покрытием и увеличение массы контртела. Так как при испытании сопряженные поверхности находятся в относительном скольжении, то частицы корунда, находящиеся в покрытии, захватывают медь и цинк с поверхности контртела и переносят обратно на покрытие. В то же время микрорельеф контртела захватывает микрочастицы меди и цинка с поверхности покрытия, и этот процесс повторяется непрерывно, что, собственно, приводит к эффекту безызносности.

**Выводы.** Термическая обработка медно-цинкового покрытия, нанесенного газодинамическим напылением при температуре 450 °С и смещении сопла на 2 мм после термической обработки в печи при температуре 420-430 °С и времени выдержки 180 мин позволяет получить покрытие, которое по химическому и фазовому составу соответствует латуни марки Л65.

Термическая обработка медно-цинкового покрытия, нанесенного газодинамическим напылением при температуре 450 °С и смещении сопла на 2 мм после термической обработки в печи при температуре 420-430 °С и времени выдержки 60 мин позволяет получить покрытие типа двойных латуней, где присутствуют твердые растворы цинка в меди с разным содержанием меди.

Испытания сопряженной пары медно-цинковое покрытие–сталь 40Х в среде индустриального масла при нагрузке до 10 МПа показывают присутствие эффекта массопереноса, который сопровождается наличием безызносности пары трения.

Нахождение в механической смеси частиц металлов (меди, цинка), оксида алюминия (корунда) не оказывает влияния на качество поверхности нанесенного покрытия и контртела. Необходимо проводить дальнейшие исследования трибологических свойств медно-цинкового покрытия как в исходном состоянии, так и после термической обработки (покрытие латуни) для определения предельной нагрузки с целью оценки области применения технологии газодинамического напыления при восстановлении поверхностей трения скольжения.

#### Библиографический список

1. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и техноло-*

*гии.* 2023. Т. 17. №1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.

2. Wu K., Sun W., Tan A. An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings. *Surface and Coatings Technology.* 2021. N424. 127660. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127660.

3. Zongxiao Zhu, Tianzuo Shi, Jun Yang. Effect of WC-17Co content on microstructure, mechanical properties and tribological behavior of low-pressure cold sprayed tin bronze composite coating. *Surface and Coatings Technology.* 2023. N465. 129589. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129589>.

4. Pengyuan Diao, Fang Wang, Zexin Yu. Microstructure, mechanical properties, and cavitation erosion performances of cold sprayed CuZn35 coatings. *Surface and Coatings Technology.* 2022. N451(1). 129074. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129074>.

5. Fu Jun Wei, Bang Yen Chou, Shu Yi Tsai. Thermomechanical properties of cold-sprayed copper coatings from differently fabricated powders. *Surface and Coatings Technology.* 2022. N434. 128.128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128128>.

6. Winnicki M., Baszczuk A., Jasiorski M. Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment. *Surface and Coatings Technology.* 2023. N456(1). 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>.

7. Bruera A., Bolelli G., Lusvardi L. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness. *Surface and Coatings Technology.* 2023. N466. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129651>.

8. Xie X., Yin S., Raoelison R. Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review. *J. Mater Sci Technol.* 2021. N86. 20-55. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.026.

9. Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Муравьева Т.И. и др. Особенности формирования медно-цинковых покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2023. №6. С. 270-276. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-6-270-276.

10. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С. и др. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь–сталь // *Трение и износ.* 2023. Т. 44. №4. С. 322-335. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.

11. Куксенова Л.И., Козлов Д.А. Анализ зависимости триботехнических свойств медных сплавов от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое // *Вестник научно-технического развития.* 2023. N2(169). С. 14-28. DOI: 10.18411/vntr2023-169-2.

**References**

1. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. *Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. Agricultural machines and technologies.* 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
2. Wu K., Sun W., Tan A. *An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings.* *Surface and Coatings Technology.* 2021. N424. 127660. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127660.
3. Zongxiao Zhu, Tianzuo Shi, Jun Yang. *Effect of WC-17Co content on microstructure, mechanical properties and tribological behavior of low-pressure cold sprayed tin bronze composite coating.* *Surface and Coatings Technology.* 2023. N465. 129589. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129589>.
4. Pengyuan Diao, Fang Wang, Zexin Yu. *Microstructure, mechanical properties, and cavitation erosion performances of cold sprayed CuZn35 coatings.* *Surface and Coatings Technology.* 2022. N451(1). 129074. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129074>.
5. Fu Jun Wei, Bang Yen Chou, Shu Yi Tsai. *Thermomechanical properties of cold-sprayed copper coatings from differently fabricated powders.* *Surface and Coatings Technology.* 2022. N434. 128128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128128>.
6. Winnicki M., Baszczuk A., Jasiorski M. *Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment.* *Surface and Coatings Technology.* 2023. N456(1). 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>.
7. Bruera A., Bolelli G., Lusvarghi L. *Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness.* *Surface and Coatings Technology.* 2023. N466. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129651>.
8. Xie X., Yin S., Raelison R. *Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review.* *J. Mater Sci Technol.* 2021. N86. 20-55. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.026.
9. Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Muravyeva T.I., et al. *Features for formation of copper-zinc coatings. Strengthening technologies and coatings.* 2023. N6. 270-276 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.
10. Arkhipov V.E., Kuksenova L.I., Pugachev M.S., et al. *The influence of copper-modified surface layers on the performance of steel-steel sliding friction pairs.* *Friction and wear.* 2023. Vol. 44. N4. 322-335 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.
11. Kuksenova L.I., Kozlov D.A. *Analysis of the dependence of tribotechnical properties of copper alloys on structural and phase transformations in the surface layer.* *Bulletin of scientific and technical development.* 2023. N2(169). 14-28 (In Russian). DOI: 10.18411/vntr2023-169-2.

**Заявленный вклад соавторов**

Архипов В.Е. – подготовка текста, анализ литературных данных;  
Москвитин Г.В. – научное руководство, анализ и доработка текста;  
Пугачев М.С. – доработка, редактирование текста и литературных данных.  
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Contributions of the coauthors**

Arkhipov V.E. – text preparation, analysis of literary data;  
Moskvitin G.V. – scientific guidance, analysis and revision of the manuscript;  
Pugachev M.S. – revision, editing of text and literary data.  
All authors read and approved the final version of the manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.12.2023

Статья принята к публикации 29.01.2024

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ШЕЕК КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА,  
ВОССТАНОВЛЕННЫХ УСТАНОВКОЙ СТАЛЬНЫХ ПОЛУКОЛЬЦЕВЫХ НАКЛАДОК**



*Евгений Алексеевич Берденников, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: dinaminator@yandex.ru*

*Вологодская государственная молочнохозяйственная академия  
имени Н.В. Верещагина, г. Вологда, Российская Федерация*

**Реферат.** Установка стальных полукольцевых накладок на шейки коленчатого вала представляет собой рациональное технологическое решение, позволяющее значительно уменьшить температурную деформацию вала при его восстановлении по сравнению с наплавкой и приваркой ленты. (Цель исследования) Определить интенсивность изнашивания шеек коленчатого вала, восстановленных установкой стальных полукольцевых накладок. (Материалы и методы) Произвели теоретический расчет интенсивности изнашивания восстановленных шеек вала по методу И.В. Крагельского. Выбрали в качестве экспериментального образца коленчатый вал дизельного двигателя автомобиля Volkswagen Transporter; бывший в эксплуатации. Устанавливали полукольцевые накладки на шейки коленчатого вала путем сваривания стыковым швом между собой. Основным критерием экспериментальной оценки служила интенсивность изнашивания восстановленных шеек в условиях реальной эксплуатации. Применяли при измерении износа метод профилограмм и метод микрометрического измерения диаметров шеек вала до и после определенного пробега автомобиля. (Результаты и обсуждение) Указали, что значения износа коренных шеек при реальном пробеге автомобиля сопоставимы с результатами теоретических расчетов. Отметили, что износ шатунных шеек превышает износ коренных, что можно объяснить отсутствием термообработки полуколец шатунных шеек при восстановлении вала. Фактические значения овальности и конусности шеек находятся в пределах допустимого значения. Значения износа, полученные путем измерения шероховатости до и после периода испытаний, сопоставимы со значениями, полученными методом микрометрического измерения. (Выводы) Интенсивность изнашивания шатунных и коренных шеек вала сопоставима со значениями, определенными теоретическим расчетом, что позволяет сделать заключение о положительном результате экспериментальных исследований. Значения интенсивности изнашивания, определенные экспериментальным и теоретическим путем, находятся в пределах, установленных более ранними исследованиями в области трибологии, что говорит о достоверности результатов эксперимента. Таким образом, подтвердили применимость метода установки стальных полукольцевых накладок при восстановлении коленчатых валов автотракторных двигателей.

**Ключевые слова:** коленчатый вал, полукольцевые накладки, сваривание, шероховатость, микрометрические измерения, интенсивность изнашивания.

**Для цитирования:** Берденников Е.А. Исследование процесса изнашивания шеек коленчатого вала, восстановленных установкой стальных полукольцевых накладок // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 60-66. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-60-66. EDN: EEFSQG.

Scientific article

**WEAR PROCESS IN CRANKSHAFT JOURNALS RESTORED BY INSTALLING  
STEEL SEMI-RING LININGS**

*Evgeniy A. Berdennikov, Ph.D.(Eng.), associate professor*

*Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin Vologda, Russian Federation*



**Abstract.** Installation of steel semi-ring linings on the crankshaft journals is a rational technological solution that can significantly reduce the thermal deformation of the crankshaft in the process of its restoration compared to building-up welding or tape welding. (Research purpose) The research purpose is studying the wear rate in crankshaft journals restored by installing steel semi-ring linings. (Materials and methods) The wear rate in the restored crankshaft journals has been theoretically calculated using I.V. Kragelsky's method. The diesel engine crankshaft in a Volkswagen Transporter car, which was in operation, has been taken as an experimental sample. The semi-ring linings have been installed on the crankshaft journals by butt welding to each other. The main criterion for the experimental evaluation is the wear rate of the restored journals under real operating conditions. When measuring wear, both the profilogram method and the micrometric method have been used for measuring the diameters of the crankshaft journals before and after a certain car run. (Results and discussion) The values of the main journal wear during real car run are comparable to the theoretical calculation results. The wear degree of the connecting rod journals exceeds the wear of the main ones, which can be explained by absence of heat treatment of the half rings in the connecting rod journals when restoring the shaft. The actual values of ellipticity as well as taper rates of the journals are within the acceptable values. The wear values obtained by measuring roughness before and after the test period are comparable to those obtained by micrometric measurement. (Conclusions) The wear rate of both connecting rod and main crankshaft journals is comparable to the values determined by theoretical calculation, which makes it possible to conclude that the experimental research has a positive result. The wear rates determined both experimentally and theoretically are within the limits established by earlier studies in the field of tribology, which indicates the reliability of the experimental results. Thus, the applicability of the method of installing steel semi-ring linings when restoring crankshafts of automotive engines has been confirmed.

**Keywords:** crankshaft, half-ring linings, welding, roughness, micrometric measurements, wear rate.

**For citation:** Berdennikov E.A. Wear process in crankshaft journals restored by installing steel semi-ring linings. *Machinery technical service*. 2024. Vol. 62. N1. 60-66 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-60-66. EDN: EEFSQG.

К настоящему времени разработано множество способов восстановления коленчатых валов, многие из них связаны с нанесением слоя металла на изношенную поверхность путем наплавки, напыления или приварки ленты. Особого внимания заслуживает метод восстановления шеек коленчатых валов установкой полуколец. Одним из первоисточников данного метода можно считать патент РФ № 2235009 (авторы Зуев А.А. и другие) [1].

Основным его преимуществом служит меньшая температурная деформация вала по сравнению с восстановлением наплавкой [2].

Причем при наплавке происходит не только коррозия, но и изменение длины вала [3].

Восстановление шеек коленвалов приваркой ленты также вызывает их температурную деформацию [4]. Для подтверждения эффективности восстановления шеек коленчатых валов установкой полуколец в ремонтном производстве целесообразны исследования процесса изнашивания коленчатого вала в условиях реальной эксплуатации, результаты которых представили в данной работе.

**Цель исследования** – определить интенсивность

изнашивания шеек коленчатого вала, восстановленных установкой стальных полукольцевых накладок.

**Материалы и методы.** Цилиндрическую поверхность шейки коленчатого вала следует рассматривать как неприработанную поверхность без волнистости. Коленчатый вал работает в условиях смешанной смазки, когда при различных режимах работы двигателя может быть как жидкостное, так и граничное трение, а в некоторых случаях, например, при пуске двигателя, также возможен контакт выступов микронеровностей сопрягаемых поверхностей при малой площади контакта. Расчет интенсивности изнашивания шеек вала производили по методу И.В. Крагельского, используя зависимость:

$$I = K_2 \alpha K_{tV} p^{1 + \frac{t_y}{2v+1}} E^{\frac{2vt_y}{2v+1} - 1} \Delta^{\frac{vt_y}{2v+1}} \left( \frac{kf_m}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (1)$$

где  $K_2$  – коэффициент, зависящий от параметров  $t_y$  и  $v$ ;  $\alpha$  – коэффициент упругой осадки (для упругого контакта металлических поверхностей  $\alpha = 0,5$ );  $K_{tV}$  – поправочный коэффициент;  $p$  – номинальное

давление трущихся поверхностей, МПа;  $t_y$  – величина показателя фрикционной усталости;  $\nu$  – параметр опорной кривой;  $E$  – модуль упругости материала детали, МПа;  $\Delta$  – безразмерный показатель шероховатости;  $k$  – коэффициент, характеризующий напряженное состояние в контакте;  $f_m$  – молекулярная составляющая коэффициента трения;  $\sigma_0$  – фрикционная усталость материала детали, МПа.

Физико-механические характеристики для стального вала, подвергнутого поверхностной закалке, и вкладыша, изготовленного из подшипникового сплава, нашли в справочных таблицах [5]:

$E = 2,2 \cdot 10^5$  МПа;  $\sigma_0 = 700$  МПа;  $f_m = 0,04$ ;  $t_y = 7,9$ ;  $k = 4$ . Номинальное давление в зоне контакта для автотракторных коленчатых валов  $p = 2,5$  МПа [6].

Параметры шероховатости поверхности после круглого тонкого шлифования:  $R_a = 0,16$  мкм;  $R_{max} = 0,98$  мкм;  $R_p = 0,05$  мкм;  $t_p = 0,5$ ;  $r = 550$  мкм. По формулам (2), (3) определили параметры опорной кривой:

$$\nu = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1, \quad (2)$$

$$b = t_m \left( \frac{R_{max}}{R_p} \right)^\nu, \quad (3)$$

где  $t_m$  – относительная опорная длина профиля на средней линии, ед.;  $R_p$  – наибольшая высота выступа, мкм;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  $R_{max}$  – наибольшая высота неровностей профиля, мкм.

$$\nu = 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,5}{0,16} - 1 = 2,1; \quad b = 0,5 \cdot \left( \frac{0,98}{0,5} \right)^{2,1} = 2,05$$

Определили безразмерный показатель шероховатости:

$$\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{1/\nu}}, \quad (4)$$

где  $r$  – приведенный радиус неровностей, мкм.

$$r = \sqrt{r_n r_{np}}, \quad (5)$$

где  $r_n$  и  $r_{np}$  – среднее значение радиусов кривизны вершин выступов соответственно для поперечной и продольной профилограмм.

$$\Delta = \frac{0,98}{550 \cdot 2,05^{\frac{1}{2,1}}} = 1,26 \cdot 10^{-3}$$

Вычислили коэффициент  $K_2$ :

$$K_2 = 0,5 \left( t_y - 1 - \frac{1}{2\nu} \right) \cdot \frac{1}{2^{2\nu}} K_1 \quad (6)$$

где  $K_1$  – коэффициент, определяемый геометрической

конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях твердых тел, обычно  $K_1 \approx 0,2$ .

$$K_2 = 0,5 \left( 7,9 - 1 - \frac{1}{2 \cdot 2,1} \right) \times 2^{\frac{1}{2 \cdot 2,1}} \times 0,2 = 2,3 \times 10^{-3}$$

По номограмме определили коэффициент  $K_{I\nu}$ . Для  $t_y = 7,9$  и  $\nu = 2,1$  коэффициент  $K_{I\nu} = 4,6$ . По формуле (1) нашли интенсивность изнашивания шейки коленчатого вала, восстановленной установкой закаленных стальных полуколец:

$$I = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 4,6 \cdot 2,5 \left( 1 + \frac{7,9}{2 \cdot 2,1 + 1} \right) \cdot \left( 2,2 \cdot 10^5 \right)^{\left( \frac{2 \cdot 2,1 \cdot 7,9}{2 \cdot 2,1 + 1} \right)} \times \\ \times \left( 1,55 \cdot 10^{-3} \right)^{\frac{2,1 \cdot 7,9}{2 \cdot 2,1 + 1}} \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,04}{700} \right)^{7,9} = 2,8 \cdot 10^{-11}$$

Интенсивность изнашивания шеек коленчатых валов находится в интервале от  $1,8 \cdot 10^{-12}$  до  $4,6 \cdot 10^{-11}$  [5].

Таким образом, на данном этапе теоретических исследований результат расчета можно считать удовлетворительным. В качестве экспериментального образца выбрали коленчатый вал дизельного двигателя автомобиля *Volkswagen Transporter* рабочим объемом 1,9 л, бывший в эксплуатации. Номинальные размеры шеек вала (нового) следующие: коренные шейки  $54_{-0,042}^{-0,022}$  мм; шатунные шейки  $47,8_{-0,042}^{0,022}$  мм. Приняты следующие значения номинальной толщины устанавливаемых полуколец после окончательной механической обработки при восстановлении вала: коренных шеек – 1,5 мм; шатунных шеек – 1,4 мм. Номинальный диаметр шейки после шлифования под внутренний диаметр полуколец определили по формуле:

$$d_{II} = d - 2s_{II}, \quad (7)$$

где  $d$  – номинальный диаметр шейки нового коленчатого вала, мм;  $s_{II}$  – толщина установленных полуколец после окончательной механической обработки, мм. Готовые кольца перед термической обработкой показали на *рисунке 1*.

Термообработке подвергались только коренные шейки. Такое решение обосновано возможностью сравнить износостойкость восстановленных шеек коленчатого вала с полукольцами, подвергнутыми и не подвергнутыми термообработке. Термическая обработка колец заключалась в закалке с охлаждением в масле и низком отпуске.

Установка полуколец на шейки коленчатого вала, закрепленного в токарно-винторезном станке 1А62, включала базирование (прижатие) полуколец к шейкам с помощью струбины и сваривание колец между собой.



Рис. 1. Кольца коренных и шатунных шеек перед термообработкой  
Fig. 1. Rings of the main and connecting rod journals before heat treatment

При этом накладки нагревались сильнее, чем сама шейка, и при остывании, а соответственно, и уменьшении их общей окружной длины, возникал натяг между сварными полукольцевыми накладками и шейкой вала. Сварку осуществляли с помощью сварочного полуавтомата *MIG 200 REAL*. Коленчатый вал с установленными накладками до шлифования шеек представили на *рисунке 2*.

После установки полукольцевых накладок шейки коленчатого вала шлифовали в размер, соответствующий номинальному диаметру, как коренной, так и шатунной шейки нового коленчатого вала с помощью специализированного круглошлифовального станка *3А423*.

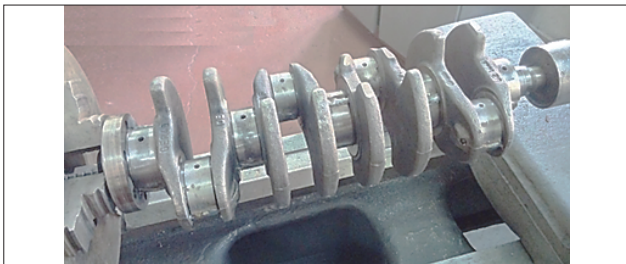


Рис. 2. Коленчатый вал с установленными полукольцами  
Fig. 2. Crankshaft with half-rings installed

После шлифования шеек вручную производили снятие фасок в отверстиях масляных каналов с помощью простого приспособления, представляющего собой спиральное сверло по металлу с прикрепленной к нему рукояткой. Далее фаски дополнительно обрабатывали шлифовальной шкуркой зернистостью *P800* также вручную.

Помимо определения размерных характеристик выполнили измерение твердости шеек восстановленного коленчатого вала.

Твердость коренных шеек в местах наложения сварочных швов, как и ожидалось, ниже твердости закаленной поверхности, так как сварочный шов не подвергался дополнительной термообработке. С другой стороны, при сварке происходил отпуск участков накладок, находящихся около сварочной ванны.

Измерение твердости производили в точках 0, 1, 2 и 3 согласно схеме, изображенной на *рисунке 3*.

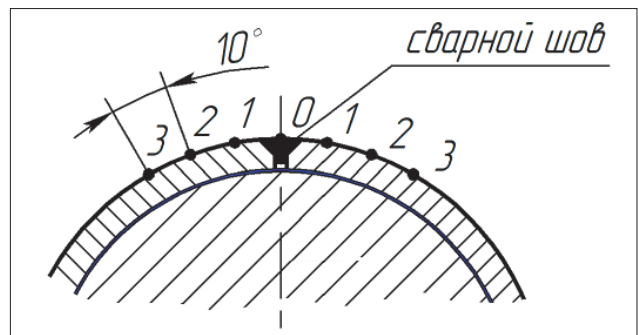


Рис. 3. Схема измерения твердости  
Fig. 3. Hardness measurement scheme

Твердость закаленной поверхности *HRC 46-49* соответствует нормативной твердости Ст. 45 после закалки, но ниже твердости шеек вала, изготовленного из высокопрочного чугуна, до восстановления (*HRC 63*). Измерение проводили с помощью переносного динамического твердомера *ТЭМП-2*. Результаты измерения твердости полукольцевых накладок, установленных на шатунных шейках и не подвергнутых термообработке, показали, что твердость в зоне сварочного шва (точка 0) выше, чем в удалении от шва. Это можно объяснить различными механическими свойствами материалов полукольцевых накладок и сварочной проволоки.

Измерили шероховатости первой коренной шейки после шлифования по восьми базовым длинам вдоль оси шейки с использованием профилометра *TR-200*. Средние значения параметров шероховатости составили:  $R_{a\text{ в ос}} = 0,806$ ;  $R_{z\text{ в ос}} = 4,712$  мкм.

**Результаты и обсуждение.** При проведении измерений износа шеек коленчатого вала, восстановленного установкой стальных полукольцевых накладок, наиболее приемлемы микрометрические методы измерения. Причем предлагается комплексное применение метода профилограмм и метода микрометрического измерения диаметров шеек вала до и после некоторого пробега или наработки. Основным критерием экспериментальной оценки процесса изнашивания шеек восстановленного коленчатого вала служит интенсивность изнашивания.

Пробег автомобиля во время испытаний составил  $S_A = 22698$  км.

Обкатку автомобиля осуществляли в диапазоне пробега 2-3 тыс. км.

Эксплуатация автомобиля в реальных условиях – в диапазоне пробега 20-30 тыс. км.

Односторонний износ шеек определяли по формуле:

$$U = \frac{d_{вос} - d_{исп}}{2}, \quad (8)$$

где  $d_{вос}$  – диаметр шейки после восстановления вала, мм;  $d_{исп}$  – диаметр шейки после периода эксплуатационных испытаний, мм.

Шероховатость  $R_{Z_{исп}}$  первой коренной шейки измеряли на восьми участках, равноудаленных друг от друга по окружности шейки; измерение на каждом участке проводили пять раз и фиксировали среднее значение.

Односторонний износ первой коренной шейки:

$$U_1 = 2(R_{Z_{вос}} - R_{Z_{исп}}), \quad (9)$$

где  $R_{Z_{вос}}$  – параметр шероховатости  $R_Z$  шейки после восстановления коленчатого вала, мкм;  $R_{Z_{исп}}$  – параметр шероховатости  $R_Z$  шейки коленчатого вала после периода эксплуатационных испытаний, мкм.

Фактическая интенсивность изнашивания шеек коленчатого вала составила:

$$I = \frac{U}{10^6 V t}, \quad (10)$$

где  $U$  – односторонний износ, мкм;  $V$  – скорость относительного скольжения, м/ч;  $t$  – время, в течение которого происходило изнашивание, ч.

$$V = \frac{60\pi d n}{1000} = 0,19 d n, \quad (11)$$

где  $d$  – номинальный диаметр шейки, мм;  $n$  – средняя частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>.

Время изнашивания  $t$  включает только время, при котором шейка вала и вкладыш работают в условиях полужидкостного (граничного) трения, так как в условиях жидкостного трения износ практически отсутствует:

$$t = \frac{k_2 S_A}{V_A}, \quad (12)$$

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий долю времени работы двигателя в условиях полужидкостного (граничного) трения;  $S_A$  – пробег автомобиля за период эксплуатационных испытаний, км;  $V_A$  – средняя скорость движения автомобиля, км/ч.

Результаты измерения диаметра шеек восстановленного коленчатого вала после эксплуатационных испытаний представили в *таблице 1*.

Износ коренных шеек в процессе испытаний составил 2-3 мкм. Причем наибольшему износу подверглись первая и третья коренные шейки.

Износ шатунных шеек превышает износ коренных, что предварительно можно объяснить отсутствием термообработки полуколец шатунных шеек при восстановлении вала.

*Таблица 1* *Table 1*  
*Результаты определения износа шеек вала методом микрометрических измерений*  
*Results of determining wear of the crankshaft journals using the method of micrometric measurements*

Номер шейки	Наименьший диаметр, мм	Износ, мкм
коренные	1	53,961
	2	53,971
	3	53,965
	4	53,959
	5	53,970
шатунные	1	47,756
	2	47,764
	3	47,763
	4	47,765

Фактические значения овальности и конусности шеек находятся в пределах допустимого значения, которое для коленчатых валов легковых автомобилей составляет 5 мкм.

Помимо микрометрических измерений износ первой коренной шейки также определяли методом измерения шероховатости. Значения шероховатости шейки после эксплуатационных испытаний, измеренные по восьми базовым длинам в соответствии со схемой на *рисунке 4*, а также значения износа, определенные по формуле (9), представили в *таблице 2*.

Анализируя данные *таблицы 2*, можно констатировать, что значения износа, полученные путем измерения шероховатости до и после периода испытаний, сопоставимы со значениями *таблицы 1*, полученными методом микрометрического измерения.

По данным *таблицы 2* на *рисунке 4* построена лепестковая диаграмма, которая наиболее наглядно отображает износ первой коренной шейки в различных секторах окружности.

*Таблица 2* *Table 2*  
*Результаты измерения шероховатости первой коренной шейки после эксплуатационных испытаний*  
*Results of measuring roughness of the first main journal after operational tests*

Точки проекций базовых длин	1	2	3	4	5	6	7	8
Шероховатость $R_z$ , мкм	3,92	3,25	3,65	3,91	3,42	3,25	3,43	4,18
Износ, мкм	1,58	2,92	2,11	1,59	2,58	2,91	2,57	1,07

Используя данные *таблицы 1*, определили, что среднее значение износа  $U$  коренных шеек составляет 2,4 мкм, шатунных – 3, 0 мкм.



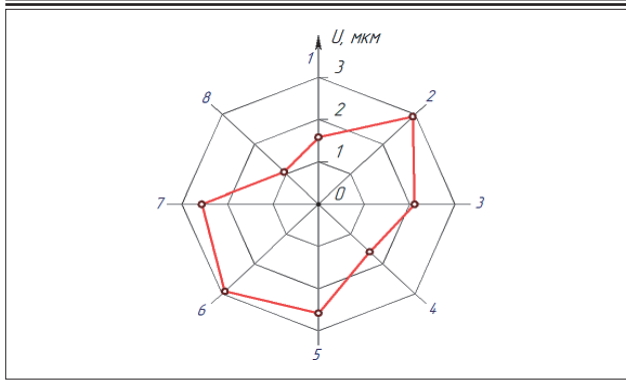


Рис. 4. Износ первой коренной шейки в различных секторах окружности (1-8 – точки проекций базовых длин при измерении шероховатости)

Fig. 4. Wear of the first main journal in various circle sectors (1-8 – points of the basic line projections when measuring roughness)

Из диаграммы следует, что износ неравномерно распределен по окружности первой коренной шейки, причем, как наименьшие, так и наибольшие значения износа на диаграмме расположены в перпендикулярных направлениях. С другой стороны, значения износа шейки в местах наложения сварочных швов ближе к среднему значению, а не к наибольшему или наименьшему значениям.

Разумеется, причиной неравномерного распределения износа по окружности шейки также может быть как отклонение формы поверхности после окончательной обработки шейки при восстановлении вала, например, отклонение от круглости, так и неравномерное распределение контактных усилий по окружности шейки в период эксплуатации [7, 8].

Для более объективного обоснования полученных данных необходимы дополнительные теоретические (например, динамический расчет двигателя) и довольно сложные экспериментальные исследования.

При номинальном диаметре  $d$  коренных и шатунных шеек 54 и 47,8 мм соответственно и средней частоте вращения коленчатого вала в период эксплуатационных испытаний  $n = 3000$  об/мин, скорость относительного скольжения  $V$ , определенная по формуле (11), составит: для коренных шеек – 30521 м/ч; для шатунных шеек – 27017 м/ч. Средняя скорость движения автомобиля при эксплуатационных испытаниях составила  $V_A = 70$  км/ч. Коэффициент, учитывающий долю времени работы двигателя в условиях полужидкостного (граничного) трения,  $-k_2 = 0,02$ .

Учитывая, что пробег автомобиля за период эксплуатационных испытаний  $S_A = 22698$  км, то по формуле (12) время, в течение которого проис-

ходило изнашивание, составит 6,5 ч. Подставляя значения износа  $U$ , скорости относительного скольжения  $V$  и времени изнашивания  $t$  в формулу (10), определили интенсивность изнашивания: коренных шеек  $I = 1,2 \cdot 10^{-11}$ ; шатунных шеек  $I = 1,7 \cdot 10^{-11}$ .

**Выводы.** Несмотря на наиболее высокую интенсивность изнашивания шатунных шеек вала по сравнению с коренными шейками, которую можно объяснить отсутствием термообработки шатунных шеек, оба значения интенсивности изнашивания меньше значения, определенного теоретическим расчетом. Этот факт позволяет сделать заключение о положительном результате экспериментальных исследований.

Также следует отметить, что значения интенсивности изнашивания, определенные как экспериментальным, так и теоретическим путем, находятся в пределах, установленных более ранними исследованиями в области трибологии [9].

Характеристики износа коленвала двигателя, рабочий объем которого сопоставим с исследуемым двигателем, также не противоречат результатам исследований, что говорит об их достоверности [10].

Таким образом, подтверждена применимость метода установки стальных полукольцевых накладок при восстановлении коленчатых валов автотракторных двигателей.

### Библиографический список

1. Зуев А.А., Бурдо Н.А., Рожков А.С. и др. Восстановление шеек коленчатых валов по технологии ПРВ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. N19. С. 302-308. EDN: PDJRFJ.
2. Шиповалов А.Н., Юдин В.М. Восстановление коленчатых валов дизельных двигателей плазменной наплавкой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. N1. С. 9-11. DOI: 10.31044/1684-2561-2021-0-1-9-11.
3. Иванов Л.П., Вигерина Т.В. Деформации коленчатых валов при их восстановлении с использованием наплавки // Технический сервис машин. 2019. Т. 57. N4(137). С. 127-135.
4. Фархшатов М.Н., Масыгутов Р.Ф. Расчет температур в зоне контакта при электроконтактной приварке ленты в импульсном режиме источника тока // Технический сервис машин. 2019. Т. 57. N4(137). С. 174-180.
5. Горленко А.О., Болдырев Д.А. Обеспечение износостойкости стали путем управляемого технологического воздействия // Сталь. 2022. N5. С. 17-20.
6. Шец С.П., Горленко А.О., Болдырев Д.А. Изнашивание стальных пар трения на уровне фактического пятна контакта // Сталь. 2022. N2. С. 27-32.
7. Королев А.Е. Влияние погрешностей формы дета-

лей на износ сопряжений двигателей // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2018. N1(22). С. 66-70. EDN: YVGVOK.

8. Карпенко М.А., Морозов А.В., Карпенко Г.В. Влияние условий эксплуатации на изменение параметров износа сопряжений ДВС // *Техника и оборудование для села*. 2021. N11(293). С. 33-35. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-11-33-35.

9. Алексаньян И.М., Хачкинаян А. Е. Исследование износа коленчатых валов и шатунов двигателей транспортно-технологических машин // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. N2. С. 47-55. DOI: 10.15593/24111678/2021.02.06.

10. Mateus J., Anes V., Galvão I., Reis L. Failure mode analysis of a 1.9 turbo diesel engine crankshaft. *Engineering Failure Analysis*. N101. 2019. 394-406.

### References

1. Zuev A.A., Burdo N.A., Rozhkov A.S., Tsyplakova I.V. Restoration of crankshaft journals by using repair sleeve technology. *Izvesniya Saint-Petersburg state agrarian university*. 2010. N19. 302-308 (In Russian). EDN: PDJRFP.

2. Shipovalov A.N., Yudin V.M. Renewal of crankshafts of diesel engines by plasma-jet hard-facing. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2021. N1. 9-11 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2021-0-1-9-11.

3. Ivanov L.P., Vigerina N.V. Deformations of crankshafts at their recovery using surfacing. *Machinery technical service*. 2019. Vol. 57. N4(137). 127-135 (In Russian).

4. Farkhshatov M.N., Masyagutov R.F. Calculation of temperatures in the contact zone during electric contact tape welding in the pulse mode of current source. *Machinery technical service*. 2019. Vol. 57. N4(137). 174-180 (In Russian).

5. Gorlenko A.O., Boldyrev D.A. Ensuring the wear resistance of steel by controlled technological action. *Stal*. 2022. N5. 17-20 (In Russian).

6. Shets S.A., Gorlenko A.O., Boldyrev D.A. Wear of steel friction pairs at the level of the actual contact area pattern. *Stal*. 2022. N2. 27-32 (In Russian).

7. Korolev A.E. Influence of parts shape deviations on the wear of engines connections. *Agrarnyy vestnik Verkhnevolzh'ya*. 2018. N1(22). 66-70 (In Russian). EDN: YVGVOK.

8. Karpenko M.A., Morozov A.V., Karpenko G.V. Influence of operating conditions on changes in wear parameters of ice mating. *Machinery and equipment for rural area*. 2021. N11(293). 33-35 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-11-33-35.

9. Aleksanyan I.M., Khachkinayan A.E. Research of the wear of crankshaft and connecting rods of engines of transportation and technological machines. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2021. N2. 47-55 (In Russian). DOI: 10.15593/24111678/2021.02.06.

10. Mateus J., Anes V., Galvão I., Reis L. Failure mode analysis of a 1.9 turbo diesel engine crankshaft. *Engineering Failure Analysis*. N101. 2019. 394-406.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 20.12.2023

Статья принята к публикации 16.01.2024

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ В СВЯЗИ С ИХ СТАРЕНИЕМ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ



*Валентин Павлович Лялякин, доктор технических наук,  
профессор, главный научный сотрудник, e-mail: valpal-1938@mail.ru;  
Вячеслав Федорович Аулов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация*

**Реферат.** Известны многочисленные публикации по восстановлению шеек коленчатых валов различными методами. В них даются рекомендации по нанесению покрытий на изношенные шейки. Однако в большинстве работ отсутствуют исследования по изменению усталостной прочности и износостойкости коленчатых валов. (Цель исследования) Определить технологические особенности восстановления шеек коленчатых валов в связи с их старением в процессе эксплуатации. (Материалы и методы) Выбрали в качестве объектов исследования коленчатые валы дизельных двигателей различных ремонтных размеров. Изучили поверхностную твердость шеек с использованием переносных твердомеров в зоне наибольшего и наименьшего износов. Обработывали данные с использованием математических методов и сравнивали с допустимыми значениями твердости для новых и изношенных шеек. Проводили усталостные испытания на машинах при нагружении изгибающим моментом по симметричному циклу до появления усталостной трещины и окончательного разрушения для различных методов нанесения покрытий. (Результаты и обсуждение) Установили, что поверхностная твердость шеек предельно изношенных валов снижается на 10 по шкале Роквелла по сравнению с твердостью для новых валов. Причина снижения связана с работой шейки в условиях сухого трения, которое вызывает нагрев поверхности. Предел выносливости предельно изношенных валов по сравнению с пределом выносливости новых коленчатых валов снижается на 20-25 процентов, что связано с накоплением усталостных разрушений. Предложили для увеличения ресурса изношенных валов с пониженной твердостью лазерную закалку. Выявили технологические особенности для восстановления шеек предельно изношенных коленчатых валов. (Выводы). Старение коленчатых валов происходит с уменьшением поверхностной твердости на 10 единиц по шкале Роквелла и уменьшения предела выносливости на 20-25 процентов. Предложили лазерное термоупрочнение шеек с пониженной твердостью, которое увеличивает износостойкость в 1,9-2,6 раза.

**Ключевые слова:** коленчатый вал, старение деталей, износостойкость, усталостная прочность, твердость, ресурс, восстановление.

**Для цитирования:** Лялякин В.П., Аулов В.Ф. Технологические особенности восстановления шеек коленчатых валов в связи с их старением в процессе эксплуатации // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 67-72. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-67-72. EDN: ELQVVJ.

Research article

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF RECOVERING CRANKSHAFT JOURNALS DUE TO THEIR AGING DURING OPERATION

*Valentin P. Lyalyakin, Dr.Sc.(Eng.), professor, chief specialist;  
Vyacheslav F. Aulov, Ph.D.(Eng.), leading researcher*

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** Numerous publications in the open press on the restoration of crankshaft necks by various methods are known. They provide recommendations for applying coatings to worn necks. However, most work lacks studies on the change in fatigue strength and wear resistance of crankshafts. (Research purpose) The research purpose is studying the technological features of recovering the crankshafts due to their aging during operation. (Materials and methods) As objects of research, crankshafts of diesel engines of various repair sizes were selected. The surface hardness of the necks was studied using portable hardness meters in the zone of the greatest and least wear. The data were processed using mathematical methods and compared with allowable hardness values for new and worn necks. Fatigue tests were carried out on machines when the bending moment was loaded along a symmetrical cycle before the appearance of a fatigue crack and final destruction for various coating methods. (Results and discussion) The surface hardness of the necks of extremely worn shafts is reduced by 10 HRC compared to the hardness for new shafts. The reason for the decrease is due to the operation of the neck in dry friction conditions, which causes heating of the surface and, as a result, tempering. The limit of endurance of limit worn shafts in comparison with the limit of endurance of new crankshafts is reduced by 20-25 percent. This is due to the accumulation of fatigue failures. Laser hardening is proposed to increase life of worn-out shafts with reduced hardness. Technological features have been developed for restoring the necks of extremely worn crankshafts. (Conclusions) The aging of crankshafts occurs with a decrease in surface hardness by 10 HRC units and a decrease in the endurance limit by 20-25 percent. Invention proposes laser thermal resistance of necks with reduced hardness, which increases wear resistance by 1.9- 2.6 times.

**Keywords:** crankshaft, aging of parts, wear resistance, fatigue strength, hardness, life, recovery.

**For citation:** Lyalyakin V.P., Aulov V.F. Technological features of recovering crankshaft journals due to their aging during operation. *Machinery technical service*. 2024. Vol. 62. N1. 67-72 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-67-72. EDN: ELQVVJ.

В последнее время в открытых публикациях появилось большое количество работ, связанных с восстановлением коленчатых валов дизельных двигателей. Анализ источников показывает, что восстановление изношенных шеек представляет собой наиболее сложный технологический вариант [1].

Так, на примере коленчатого вала двигателя КаМАЗ-740 рассмотрены причины их поступления на ремонтные предприятия, проанализированы дефекты и предложены методы восстановления. Однако в данном источнике отсутствуют исследования по усталостной прочности. В другом источнике рассматриваются методы восстановления шеек коленчатого вала с упрочнением зоны галтели, как опасного участка вала [2].

Указывается, что в зоне галтели возникают микротрещины, которые затем увеличиваются и переходят в макротрещины. В данной работе приведены результаты усталостных испытаний коленчатых валов, галтели которых упрочнены накаткой. Показано, что упрочнение галтелей коленчатого вала увеличивает предел выносливости на 30% по сравнению с пределом выносливости нового вала.

В данном исследовании отсутствуют результаты по усталостной прочности предельно-изношен-

ных коленчатых валов, т.е. прошедших все заложенные конструктором ремонтные размеры.

Относительно обоснования выбранного метода нанесения покрытий нет гибких рекомендаций. Исследуют различные методы нанесения покрытий, такие как плазменно-порошковая наплавка, электродуговая металлизация, электроконтактная приварка ленты [3].

Предлагая тот или иной метод, авторы не исследуют изменения поверхностной твердости шеек, усталостной прочности восстановленных валов.

Академик ВАСХНИЛ А.И. Селиванов во второй половине XX в. сформулировал теорию старения машин, в основу которой положил годность машины, агрегата, детали в процессе эксплуатации [4].

Учитывая разработанные основы старения машин применительно к коленчатому валу за годность принимаем показатели по поверхностной твердости и усталостной прочности вала. Зная изменения этих параметров можно назначать оптимальные варианты восстановления коленчатых валов.

**Цель исследования** – определить технологические особенности восстановления шеек коленчатых валов в связи с их старением в процессе эксплуатации.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования приняты коленчатые валы дизельных



двигателей, изготовленные из разных марок стали. Известно, что коленчатый вал, представляющий собой наиболее ответственную деталь двигателя, работает в условиях знакопеременных нагрузок. Эти нагрузки в опасных сечениях коленчатого вала вызывают образование микротрещин, которые при длительной эксплуатации могут привести к появлению макротрещин и окончательному разрушению вала. Таким образом, годность коленчатого вала может определяться путем натурных усталостных испытаний на машинах с определением предела выносливости [5].

Сопряжение «шейка вала–подшипник» работает в условиях гидродинамического трения. Однако его стабильность иногда нарушается и возникает полужидкостное, а иногда полусухое трение. В этих условиях резко возрастает скорость изнашивания поверхности вала. А из-за процессов нагрева при сухом трении может понижаться ее поверхностная твердость, которую мы измеряли переносным твердомером. Таким образом, старение коленчатых валов можно определять изменением усталостной прочности и данными по поверхностной твердости шеек [6].

**Результаты и обсуждение.** Исследования по поверхностной твердости шеек проводили на коленчатых валах разных ремонтных размеров. Известно, что износ шеек устраняется на ремонтных предприятиях перешлифовкой на ремонтные размеры, диаметр которых уменьшается на величину 0,25 мм. При шлифовке на ремонтные размеры с шеек вала снимается твердый слой. Можно предположить, что твердость шеек вала при перешлифовках будет изменяться.

Проведены измерения поверхностной твердости шеек в зоне наибольшего и наименьшего износов с использованием переносного твердомера. Результаты измерения твердости с статистической обработкой привели на *рисунке 1*. В соответствии с ГОСТ поверхностная твердость шеек новых коленчатых валов должна быть 52-56 HRC.

Полученные данные показывают, что поверхностная твердость шеек предельно изношенных валов (вышедших из ремонтных размеров) в зоне наибольшего износа равна 44,1 HRC, а в зоне наименьшего износа 54,3 HRC. Таким образом, шейки предельно изношенного коленчатого вала после эксплуатации теряют поверхностную твердость на 10 ед. HRC.

Снижение твердости шеек способствует повышенному износу, то есть снижается ресурс коленчатого вала [7].

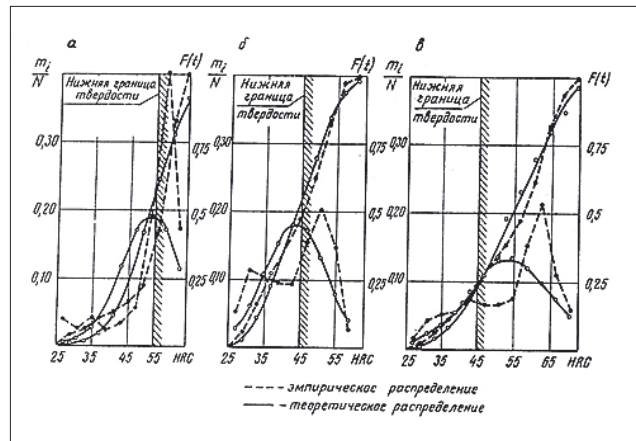


Рис. 1. Распределение твердости коренных шеек коленчатого вала двигателя: а – для нового вала; б – для предельно изношенного вала в зоне наибольшего износа; с – для предельно изношенного вала в зоне наименьшего износа

Fig. 1. Distribution of hardness of engine crankshaft main journals: a – for the new shaft; b – for the extremely worn shaft in the area of greatest wear; c – for the extremely worn shaft in the area of least wear

Для повышения ресурса коленчатого вала по износу можно, начиная со второго ремонтного размера, проводить закалку шеек с использованием токов высокой частоты (ТВЧ). Однако при индукционной закалке возникают деформации, которые трудно устранить, и они понижают усталостную прочность, по этой причине закалка ТВЧ на ремонтных предприятиях не применяется. Более перспективным методом для повышения ресурса коленчатого вала является лазерное термоупрочнение [8].

Была разработана и внедрена на одном ремонтном предприятии технология термоупрочнения шеек коленчатого вала двигателя А41. Для упрочнения использовали непрерывный  $CO_2$  лазер мощностью 800 Вт и специализированную универсальную установку. Режимы упрочнения: диаметр пятна 2,5-3 мм, частота вращения вала 24 об/мин, скорость подачи оптической системы 10-12 см/с. При данных режимах площадь закаленной части шейки вала составляет 50-60% обрабатываемой поверхности вала. Технология предусматривает контроль твердости шеек коленчатого вала переносным твердомером [9].

Шейки, у которых понижена твердость, шлифуют на последующий ремонтный размер и отправляют на участок лазерного упрочнения. Далее шейки вала полируют для снятия выплесков металла по дорожке, образованной лучом лазера. Были проведены стендовые испытания двигателя А-41 с упрочненными коленчатыми валами. Испытания показали, что износостойкость упроч-

ненных шеек валов возросла в 1,9-2,6 раза по сравнению с неупрочненными шейками. Отличительной особенностью технологии служит отсутствие деформации вала, что исключает применение дополнительных правок. Лазерное термоупрочнение практически используют как финишную операцию после шлифования шейки на ремонтный размер. Применение лазерного термоупрочнения позволяет значительно повысить ресурс коленчатого вала по износу.

В процессе эксплуатации коленчатый вал накапливает усталостные повреждения за счет циклических напряжений. В опасных сечениях возникают микротрещины, развивающиеся в макротрещины, которые приводят коленчатый вал к разрушению. Оценить накопленные повреждения в опасных сечениях вала достаточно трудно. Существуют неразрушающие методы определения напряженного состояния вала путем измерения коэрцитивной силы [10].

Однако данный метод не нашел широкого применения, поэтому исследователи используют натурные усталостные испытания изделия.

В целях определения предела выносливости использовали нормативные документы по испытаниям. Для коленчатого вала проводили усталостные испытания при действии изгибающих знакопеременных нагрузок. При этих нагрузках довели испытания до образования трещин в зоне галтели с последующим разрушением по щекам вала. Были проведены широкомасштабные экспериментальные исследования различных марок коленчатых валов [11].

Анализ исследований показал, что предел выносливости коленчатых валов, вышедших из ремонтных размеров, когда их необходимо восстанавливать до номинальных размеров, снижается на 20-25% от пределов выносливости новых валов [12].

Таким образом, на восстановление шеек поступают валы, у которых снижена усталостная прочность. Применяемые сварочно-наплавочные методы восстановления способствуют наведению остаточных напряжений растяжения, которые снижают усталостную прочность. Учитывая это, проблемы восстановления коленчатых валов сводятся к снятию накопленных повреждений в опасных сечениях (галтелей) и созданию условий, направленных на уменьшение накопленных усталостных повреждений. Для этих целей существуют следующие технологические приемы (рис. 2).

Изношенную шейку перед восстановлением шлифуют для удаления износа на глубину 0,1-0,15 мм на сторону.

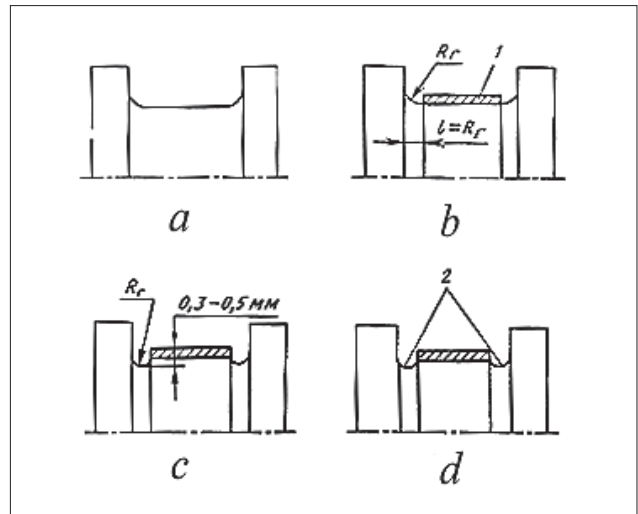


Рис. 2. Шейка изношенного вала: а – наплавленная; б – с углубленными галтелями; 1 – наплавленный металл; с – упрочненная дробью; 2 – зона упрочнения дробью (d)

Fig. 2. Journal of worn-out shaft: a – deposited; b – with deep fillets; 1 – deposited metal; c – hardened by shot; 2 – shot hardening zone (d)

На подготовленную поверхность наносят компенсационный слой на толщину, обеспечивающую с припуском на механическую обработку диаметра, равную диаметру шейки нового вала, исключая поверхность галтели, с удалением от щек на величину равную радиусу галтели (рис. 2, b). Нанесенный слой должен обеспечивать ресурс вала по износу. Поверхностная твердость нанесенного слоя должна быть 52-56 HRC. Выполняют механическую обработку нанесенного слоя шлифованием с одновременным углублением зоны галтели на 0,3-0,5 мм (рис. 2, c). Наличие такой операции позволяет снять накопленные усталостные повреждения и остаточные напряжения (растяжения), возникшие при нанесении покрытий. Для увеличения усталостной прочности можно в качестве финишной операции использовать различные виды упрочнения (дробеструйную обработку, накатку галтели) [13].

Такие технологические приемы были проверены при восстановлении коленчатого вала. Наплавку шеек вала без оплавления галтели проводили порошковой проволокой ППАН-122 с последующим шлифованием шейки вала и зоны галтелей на глубину 0,4-0,5 мм. Предел усталостной выносливости таких валов приближался к пределу выносливости новых [14].

**Выводы.** Годность коленчатых валов определяется показателями усталостной прочности и твердостью коренных и шатунных шеек вала [15].

Поверхностная твердость шеек коленчатого вала, начиная с третьего ремонтного размера, снижается на 10 HRC. Предел выносливости коленча-

тых валов, диаметры шеек которых вышли из ремонтных размеров, снижается на 20-25%. Для увеличения ресурса коленчатого вала по износу предложили лазерную закалку с доведением твердости до 50-52 HRC. В этом случае увеличивается износостойкость в 1,9-2,6 раза по сравнению с неупрочненным валом. Для увеличения ресурса коленчатого вала по усталости рекомендовали технологические варианты восстановления шеек, предусматривающие нанесение покрытий на изношенную шейку, исключая галтель, с последующей шлифовкой цилиндрической части шейки и зоны галтели и ее упрочнений. Данный метод позволяет сохранить усталостную прочность на уровне предела выносливости нового вала.

### Библиографический список

1. Прохоров Д.Г., Макаров И.Д., Яковлев Д.Д. Методы восстановления коленчатых валов автомобильных двигателей // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2020. N31. С. 90-97. EDN: UETHFW.

2. Скрябин В.А. Восстановление коленчатых валов двигателей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. N12. С. 10-16. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-12-10-16.

3. Фомин А.И., Сенин П.В., Кудряков М.С. и др. Восстановление коленчатых валов на ремонтных предприятиях Республики Мордовия // Техника и оборудование для села. 2022. N4(298). С. 22-26. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-22-26.

4. Сюдюков И.С., Рябикин А.Ю., Иванова Г.В. и др. Повышение износостойкости коленчатых валов методом плазменного напыления // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. N11. С. 196-209. EDN: VYWIQO.

5. Савенко Э.С., Савенков Н.В., Савенко С.Э. Восстановление стальных коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания методом наплавки // Современное промышленное и гражданское строительство. 2022. Т. 18. N1. С. 27-35. EDN: NEEBMM.

6. Каржаубаев А.С., Утемуратов Ж.Ж., Карманов Д.К. Эксплуатационные испытания восстановленных чугунных коленчатых валов // StudNet. 2022. Т. 5. N5. С. 7. EDN: XTDCSV.

7. Шиповалов А.Н., Юдин В.М. Восстановление коленчатых валов дизельных двигателей плазменной наплавкой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. N1. С. 9-11. DOI: 10.31044/1684-2561-2021-0-1-9-11.

8. Агеев Е.В., Серебровский В.И. Разработка и исследование технологии восстановления и упрочнения изношенных деталей машин композиционными гальваническими покрытиями с применением в качестве

упрочняющей фазы вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков микро- и нанодисперсий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11. N2. С. 42-66. EDN: CFPBWG.

9. Лялякин В.П., Слинко Д.Б. Технология восстановления отечественных коленчатых валов с трещинами на шейках // Технология металлов. 2021. N5. С. 50-55. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-5-50-55.

10. Лялякин В.П., Криворотов В.И., Луканин Б.Е. и др. Применение метода коэрцитиметрии для оценки остаточных напряжений в плоских ножах, упрочненных ТВЧ-борированием // Технический сервис машин. 2023. N1(150). С. 93-102. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-93-102.

11. Кудряков М.С., Баранов А.Ю., Фомин А.И. Исследование усталостной прочности новых, бывших в эксплуатации и восстановленных коленчатых валов // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. 2021. N4. EDN: PTTJHI.

12. Алексаньян И.М., Хачкина А.Е. Исследование износа коленчатых валов и шатунов двигателей транспортно-технологических машин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. N2. С. 47-55. DOI: 10.15593/24111678/2021.02.06.

13. Скичко Д.В., Сергеенков В.Е., Кутилин Ю.В. и др. Повышение ресурса коленчатых валов, восстанавливаемых наплавкой, направленным регулированием остаточных напряжений в наплавленном слое // Наука, техника и образование. 2020. N11(75). С. 16-19. EDN: ZKXECZ.

14. Шестопалова Л.П. Диагностика усталостных разрушений коленчатых валов ДВС. Цикл статей. Часть I. Признаки и механизм усталостных разрушений металлов. Общие сведения о коленчатых валах / Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. N4. С. 14-22. DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-4-14-22.

15. Кривоносова К.Д., Золотухина В.Г., Леонов Д.О. Обеспечение качества контроля коленчатого вала двигателя ЗМЗ на ремонтных предприятиях // Управление качеством. 2023. N11. С. 27-32. DOI: 10.33920/pro-01-2311-04.

### References

1. Prokhorov D.G., Makarov I.D., Yakovlev D.D. Methods for restoring crankshaft of automobile engines. New materials and technologies in mechanical engineering. 2020. N31. 90-97 (In Russian). EDN: UETHFW.

2. Scryabin V.A. Renewal of crankshafts. Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya. 2022. N12. 10-16 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-12-10-16.



3. Fomin A.I., Senin P.V., Kudryakov M.S., et al. Restoration of crankshafts at repair enterprises of the Republic of Mordovia. Machinery and equipment for rural area. 2022. N4(298). 22-26 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-22-26.
4. Sundyukov I.S., Ryabikin A.Yu., Ivanova G.V., et al. Increasing the wear resistance of crankshafts by plasma spraying. Modern mechanical engineering. Science and education. 2022. N11. 196-209 (In Russian). EDN: VYWIQO.
5. Savenko E.S., Savenkov N.V., Savenko S.E. Restoration of steel crankshafts of internal combustion engines by surfacing. Modern industrial and civil construction. 2022. Vol. 18. N1. 27-35 (In Russian). EDN: NEEBMM.
6. Karzhaubaev A.S., Utemuratov Zh.Zh., Karmanov D.K. Operational tests of restored cast iron crankshafts. StudNet. 2022. Vol. 5. N5. 7 (In Russian). EDN: XTDCSV.
7. Shipovalov A.N., Yudin V.M. Renewal of crankshafts of diesel engines by plasma-jet hard-facing. Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya. 2021. N1. 9-11 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2021-0-1-9-11.
8. Ageev E.V., Serebrovsky V.I. Development and research of technology for restoration and strengthening of worn machine parts by composite electroplating coatings using micro- and nanofractions containing tungsten-containing electroerosive powders as the strengthening phase. Proceedings of the southwest state university. Series: Engineering and technologies. 2021. Vol. 11. N2. 42-66 (In Russian). EDN: CFPBWG.
9. Lyalyakin V.P., Slinko D.B. Recovery technology of domestic crankshafts with cracks on the necks. Tehnologiya metallov. 2021. N5. 50-55 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-5-50-55.
10. Lyalyakin V.P., Krivorotov V.I., Lukanin B.E., et al. Application of coercytometry method for evaluation of residual stresses in flat knives. Machinery technical service. 2023. N1(150). 93-102 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-93-102.
11. Kudryakov M.S., Baranov A.Yu., Fomin A.I. Research of the fatigue strength of new, used and restored crankshafts. Scientific Review. International scientific and practical journal. 2021. N4. (In Russian). EDN: PTTJHI.
12. Aleksanyan I.M., Khachkinayan A.E. Research of the wear of crankshaft and connecting rods of engines of transportation and technological machines. Transport. Transport facilities. Ecology. 2021. N2. 47-55 (In Russian). DOI: 10.15593/24111678/2021.02.06.
13. Skichko D.V., Sergeenkov V.E., Kutilin Yu.V., et al. Increasing the resource of crankshaft, recovery by surface, directed regulation of residual voltage in the soldered layer. Science, technology and education. 2020. N11(75). C. 16-19 (In Russian). EDN: ZKXECZ.
14. Shestopalova L.P. Fatigue fracture diagnostics of crankshafts of internal-combustion engines. Series of articles. Part 1. Indications and mechanism of fatigue fractures of metals. General information on crankshafts. Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya. 2023. N4. 14-22 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-4-14-22.
15. Krivonosova K.D., Zolotukhina V.G., Leonov D.O. Quality assurance of control of the crankshaft of the ZMZ engine at repair facilities. Quality management. 2023. N11. 27-32 (In Russian). DOI: 10.33920/pro-01-2311-04.

#### Заявленный вклад соавторов

Лялякин В.П. – научное руководство, анализ и доработка текста;  
 Аулов В.Ф. – редактирование текста, анализ литературных данных.  
 Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Contributions of the coauthors

Lyalyakin V.P. – scientific guidance, analysis and revision of the manuscript;  
 Aulov V.F. – text editing, analysis of literary data.  
 All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 19.12.2023**  
**Статья принята к публикации 31.01.2024**



**ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БРОНЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОМАШИН**



*Илья Владимирович Романов, младший научный сотрудник,  
e-mail: gosniti1953@mail.ru*

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,  
Москва, Российская Федерация*

**Реферат.** В процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники детали машин и их соединения теряют работоспособность, что требует их замены. Себестоимость восстановления составляет 50-60 процентов от стоимости новой детали. Наличие в технике деталей из цветных металлов и сплавов, а в частности из бронзы, делает вопрос восстановления еще более актуальным из-за высокой стоимости таких деталей. Особенно успешно при восстановлении изношенных деталей применяются методы, использующие порошковые материалы. Характерно, что для удешевления подобных технологий можно прибегать к рециклингу металлических отходов и получать порошок электроэрозионным диспергированием без особых экономических затрат. (Цель исследования) Изучить возможность восстановления бронзовых деталей гидромашин вторичными порошковыми материалами и проанализировать триботехнические показатели получаемых покрытий. (Материалы и методы) Использовали в работе следующее оборудование: генератор импульсов модели «Элитрон-52Б», растровый электронный микроскоп, установку искрового плазменного спекания, установку электроискрового легирования, рентгенофлуорисцентный спектрометр, металлографический микроскоп, трибометр, весы аналитические, шкаф сушильный, набор сит. (Результаты и обсуждение) Изготовили электроды из бронзового порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования. Создали с помощью электроискрового легирования образцы с покрытиями из стандартного и нового полученного электрода. Сравнили триботехнические свойства данных покрытий. Провели металлографический и химический анализы. (Выводы) Покрытия, полученные с помощью нового электрода, показали лучшие триботехнические характеристики при сухом трении. При граничном трении их показатели были хуже, что может быть связано с некорректным выбором смазки, режимов электроискрового легирования и нарушением технологии получения самого электрода. Но в целом использование вторичных порошковых материалов для восстановления бронзовых деталей является актуальным.

**Ключевые слова:** вторичные порошковые материалы, электроэрозионное диспергирование, бронзовые детали, гидромоторы и гидронасосы, триботехнические характеристики, показатель прирабатываемости, фактор износа.

**Для цитирования:** Романов И.В. Применение вторичных порошковых материалов для восстановления бронзовых деталей гидромашин // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 73-79. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-73-79. EDN: QGGXHL.

**Research article**

**THE USE OF SECONDARY POWDER MATERIALS FOR THE RESTORATION  
OF BRONZE PARTS OF HYDRAULIC MACHINES**

*Ilya V. Romanov, junior researcher*

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** During the operation of agricultural machinery, machine parts and their connections lose their operability, which requires their replacement. The cost of restoration is 50-60 percent of the cost of a new part. The presence of non-ferrous metal and alloy parts in the equipment, and in particular bronze, makes the issue of restoration even more urgent due to the high cost of such parts. Methods using powder materials are particularly successful in restoring worn parts. It is characteristic that in order to reduce the cost of such technologies, it is possible to resort to recycling of metal waste and obtain powder by electroerosive dispersion without special economic costs. (Research purpose) The research purpose is studying the restoration of bronze parts of hydraulic machines with secondary powder materials and analyzing the tribotechnical indicators of the coatings obtained. (Materials and methods) The following equipment was used in the work: an Elitron-52B pulse generator, a scanning electron microscope, a spark plasma sintering unit, an electric spark alloying unit, an X-ray fluorescence spectrometer, a metallographic microscope, a tribometer, analytical scales, a drying cabinet, a set of sieves. (Results and discussion) Electrodes were made from bronze powder obtained by the method of electroerosive dispersion. Using electric spark alloying, samples with coatings from a standard and a new obtained electrode were created. The tribotechnical properties of these coatings were compared. Metallographic and chemical analyses were performed. (Conclusions) The coatings obtained with the new electrode showed the best tribotechnical characteristics in dry friction. At boundary friction, their performance was worse, which may be due to an incorrect choice of lubrication, modes of electric spark alloying and a violation of the technology for obtaining the electrode itself. In general, the use of secondary powder materials for the restoration of bronze parts is relevant.

**Keywords:** secondary powder materials, electroerosive dispersion, bronze parts, hydraulic motors and hydraulic pumps, tribological characteristics, running-in indicator, wear factor.

**For citation:** Romanov I.V. The use of secondary powder materials for the restoration of bronze parts of hydraulic machines. *Machinery technical service*. 2024. Vol. 62. N1. 73-79 (in Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-73-79. EDN: QGGXHL

Основной причиной выхода из строя сельскохозяйственной техники в большинстве случаев служит неизбежный износ конструктивных деталей. При ремонте техники, как правило, изношенные детали, не подлежащие восстановлению, часто выбраковывают с заменой их на новые, что повышает себестоимость ремонта.

Известно, что детали современных машин и механизмов выбраковывают при очень малых износах. Например, свыше 85% деталей автомобилей, тракторов и некоторых других самоходных сельскохозяйственных машин становятся неработоспособными при износах до 0,2-0,3 мм, т. е. при потерях массы, составляющих десятые и даже сотые доли процента от массы самих деталей [1].

Ремонт сельскохозяйственной техники на 70-80% проводится с использованием запасных частей, при этом простой машин из-за их отсутствия или низкого качества приводят к большим потерям сельскохозяйственной продукции. Стоимость запасных частей непрерывно возрастает и поэтому восстановление изношенных деталей с обеспечением их ресурса на уровне новых – один из самых эффективных путей экономии средств.

В ремонтном производстве широко применя-

ются порошковые материалы при плазменной, газопорошковой, электродуговой наплавках, наплавке ленточными порошковыми электродами и т. д. Наряду с наплавочными технологиями существуют процессы восстановления изношенных деталей при спекании или напекании порошков (электродуговые процессы), а также термодиффузионные и другие процессы [2].

Однако в большинстве своем во всех этих процессах используются железосодержащие порошки.

Одной из особенностей сельскохозяйственных машин служит применение в их конструкциях достаточно большого количества деталей из цветных металлов и сплавов, так как они обладают высокими антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью, выдерживают значительные удельные нагрузки и высокие скоростные режимы [3].

Наиболее дорогостоящие и ответственные бронзовые детали чаще всего применяются в узлах гидроаппаратуры. Например, это гидромоторы и гидронасосы серии 310, которые являются частью гидростатической трансмиссии (ГСТ) комбайна Енисей-324, применяются во многих моделях фронтальных погрузчиков, на катках, в большом количестве машин коммунальных служб, в кранах и

манипуляторах, в автобетоносмесителях, а также в технологическом оборудовании (различные прессы, гидравлические ножницы, загрузочные машины, насосные станции литейных машин и др.).

Высокая стоимость металлических порошковых материалов, особенно из цветных металлов и сплавов, и энергозатратность способов их получения ведет к удорожанию технологий восстановления и упрочнения деталей. Решить данную проблему помогает рециклинг металлических отходов [4].

Наиболее перспективным и энергоэффективным способом переработки отходов машиностроительных производств служит метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД).

В работе представлены результаты триботехнических исследований бронзовых покрытий, полученных электроискровой обработкой (ЭИО) поверхности образцов электродом из бронзы, спеченной из вторичных порошковых материалов.

**Цель исследования** – изучить возможность восстановления бронзовых деталей гидромашин вторичными порошковыми материалами и проанализировать триботехнические показатели получаемых покрытий.

**Материалы и методы.** Для проведения экспериментальных исследований была приготовлена партия диспергированного бронзового порошка из отходов производства бронзы способом электроэрозионного диспергирования, которая была подвергнута искровому плазменному спеканию до получения плотного брикета вторичного сплава следующего состава: 95% бронзы марки БрАЖ9-4, остальное – медь марки М1 и бронза марки БрКМц3-1 [5].

Сама бронза марки БрАЖ9-4 относится к недорогим и наиболее доступным бронзам, поскольку в ее составе отсутствует дорогостоящий элемент – олово. При этом по своим качественным характеристикам она не уступает оловянным бронзам и обладает довольно высокими технологическими и эксплуатационными свойствами – хорошо формуется, обрабатывается резанием, отлично сопротивляется истиранию в условиях тяжелого нагружения, обладает повышенными антикоррозионными свойствами и хорошо противостоит агрессивным средам при нормальных и повышенных температурах [6].

Данная бронза с успехом заменяет бронзы марок БрОЦ10-2, БрОЦС6-6-3, С61900 (США), 423045 (Чехия),  $CuAl8Fe3$  (Германия) и многие другие.

Для электроэрозионного диспергирования отходов бронзы использовался генератор импульсов модели «Элитрон-52Б» и стеклянный реактор с

электродами. Рабочая жидкость – дистиллированная вода. Полученный бронзовый порошок просушивали и просеивали через набор сит до получения фракции размером менее 0,071 мм. Частицы порошка имели преимущественно правильную сферическую или эллиптическую форму [7].

В гораздо меньшем количестве присутствовали частицы, имеющие неправильную форму, размер которых до 10 раз меньше вышеназванных и которые образовывали агломераты друг с другом или с более крупными частицами (рис. 1). Морфологию и форму микрочастиц определяли на растровом электронном микроскопе *TESCAN VEGA II* с системой рентгеноспектрального анализа *INCA Energy 350*.

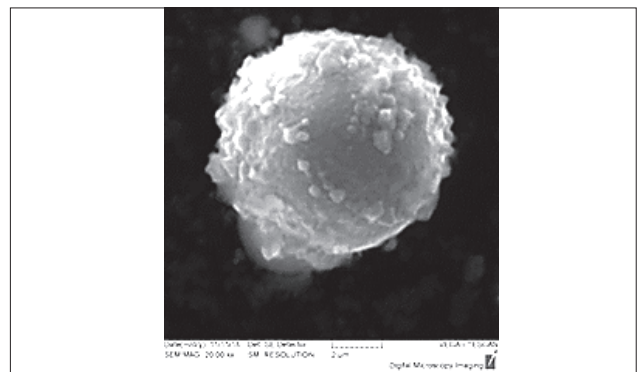


Рис. 1. Форма частиц бронзового порошка, полученного методом ЭЭД в дистиллированной воде,  $\times 20000$

Fig. 1. Particle shape of bronze powder obtained by EED method in distilled water,  $\times 20000$

Процесс спекания вторичного порошка бронзы и получения плотного брикетированного материала осуществляли на установке искрового плазменного спекания *SPS 10-3* фирмы *Thermal Technology* (США) при температуре 910 °С в течение 5 мин при давлении 40 МПа в вакууме. Скорость охлаждения составляла 100 °С/мин. Одновременно с охлаждением сбрасывали давление до 5 МПа со скоростью 15 МПа/мин [8].

После спекания брикет из бронзы разрезали на электроды для электроискровой обработки размером 6×6×30 мм.

Для сравнительного исследования триботехнических свойств были подготовлены 4 образца-диска из стали 40Х, диаметром 50 и толщиной 5 мм с нанесенными электроискровым способом на установке «Вестрон АИ-007» покрытиями электродами из бронзы марки БрАЖ9-4 (эталон) и из вторичной ИПС бронзы в виде двух дорожек шириной 10 мм (рис. 2). Режимы электроискровой обработки поверхности образцов выбирали из усло-



вия обеспечения максимальных значений параметров: по массопереносу материала, приросту толщины покрытия, скорости переноса материала (табл. 1) [9].



Рис. 2. Образец-диск (сталь 40X) с электроискровыми покрытиями

Fig. 2. Sample disk (steel 40X) with electric spark coatings

Материал электрода	Параметры			
	$U_{разр}, В$	$C_{разр}, мкФ$	$F_{имп}, Гц$	$I_p, А$
Бронза марки БрАЖ9-4	210	240	100	12
ИПС бронза	160	300	100	13

После электроискровой обработки металлопокрытия образцов шлифовали до шероховатости  $R_a 1,6-3,2$ .

**Результаты и обсуждение.** Химический состав исследуемых электродных материалов определяли при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра марки *Niton XL3t GOLD* (табл. 2).

Сравнительный анализ химического состава материалов исследуемых электродов показал незначительные их отклонения, что указывает на похожесть материала вторичной ИПС бронзы после

рециклинга на исходную бронзу БрАЖ9-4. Металлографический анализ исследуемых материалов электродов проводили на инвертированном исследовательском микроскопе *Olympus GX-51*.

Микроструктура материала электрода из ИПС бронзы состоит из мелкодисперсных зерен с более ярко выраженной шаровидной формой в отличие от структуры исходной бронзы БрАЖ9-4 (рис. 3).

Такое состояние материала электрода связано с формой частиц исходного порошка и процессом его спекания.

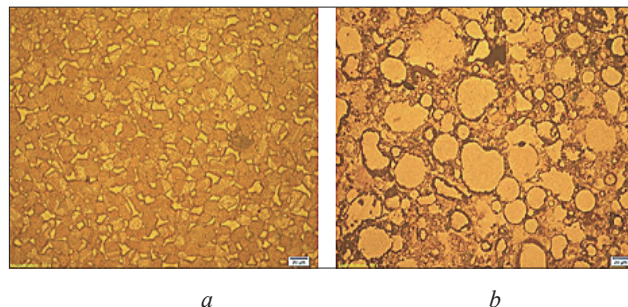


Рис. 3. Микроструктуры электродов (x500): а – из бронзы марки БрАЖ9-4; б – из спеченной ИПС бронзы

Fig. 3. Electrode microstructures (x500): a – made of BrAZh9-4 bronze; b – made of sintered SPS bronze

Металлографический анализ электроискровых покрытий электродами БрАЖ9-4 и ИПС бронзы показал, что покрытия имеют плотную структуру, в которой присутствуют незначительные дефекты в виде раковин и микротрещин (рис. 4).

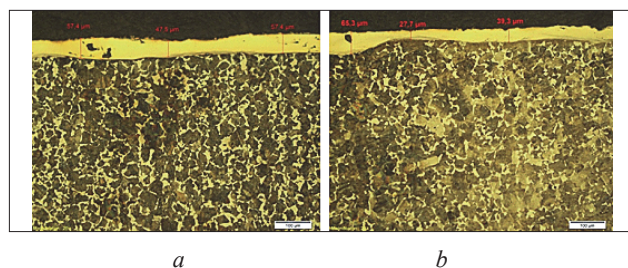


Рис. 4. Микроструктура образца с электроискровым покрытием (x200): а – бронзой БрАЖ9-4; б – ИПС бронзой

Fig. 4. Microstructure of a sample with an electric spark coating (x200): a – bronze BrAZh9-4; b – SPS bronze

Электрод	Элементы									
	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>
Бронза БрАЖ9-4	6,94±0,38	0,31±0,056	–	–	1,68±0,01	0,182±0,046	90,64±0,39	–	–	–
Бронза ИПС	4,42±0,30	0,353±0,047	0,109±0,004	0,132±0,007	1,41±0,01	–	82,57±0,27	10,21±0,05	0,134±0,006	0,284±0,011



Средняя толщина покрытия на исследуемых образцах при использовании электродов из БрАЖ9-4 составила 375 мкм, а из ИПС бронзы – 127 мкм. Значительные колебания профиля по толщине покрытия БрАЖ9-4, связанные с особенностью формирования покрытия для данного материала, потребовали выравнивания его механической обработкой, практически устраняя преимущество по толщине. Сравнительные испытания на износостойкость электроискровых покрытий электродами из бронзы марки БрАЖ9-4 (в состоянии поставки) и из вторичной ИПС бронзы выполняли на трибометре *TRB-S-DE* фирмы *CSM Instruments* в соответствии с ГОСТ 23.224-86 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы обеспечения износостойкости восстановленных деталей».

Испытания на трибометре проводили по схеме «круговое движение», по которой образец-диск с исследуемым покрытием вращался с заданной скоростью, а по нему скользил индентор (контробразец) в виде шарика из стали 100Cr6. Износостойкость исследуемых покрытий оценивали в сопряжении с контробразцом [10].

Характеристики рабочей среды испытаний: влажность – 45-50%, температура окружающего воздуха – 23-25 °С. Испытания проходили в условиях граничного (масло моторное марки М-10Г<sub>2</sub>к) и сухого трения со скоростью относительного скольжения – 0,2 м/с.

Износ испытываемых образцов-дисков и контробразцов оценивали взвешиванием до и после испытаний на аналитических весах *Acculab ALC-210d4* (предел взвешивания – 210 г, дискретность – 0,0001 г, класс – I специальный) и пересчитывался на линейный износ.

В трибометре образцы прирабатывали при ступенчатом повышении нагрузки  $P$ . По результатам этих испытаний оценивали параметры прирабатываемости исследуемых сопряжений: оптимальная нагрузка при минимальном коэффициенте трения –  $P_{оп}$ , максимальная нагрузка для приработанного сопряжения –  $P_{мп}$  и максимальная нагрузка для неприработанного сопряжения –  $P_{нп}$ , по которым рассчитывается значение показателя прирабатываемости (табл. 3):

$$\Pi = \frac{P_{мп} - P_{нп}}{\mu_0 \cdot P_{оп}} \quad (1)$$

В течении испытаний непрерывно фиксировали (на диаграмме) коэффициент трения  $\mu$  и глубину дорожки трения  $h$ .

На втором этапе проводили длительные испы-

Таблица 3

Table 3

Оценка параметров прирабатываемости сопряжений с электроискровыми покрытиями образцов-дисков БрАЖ9-4 и ИПС бронзой  
Estimation of run-in parameters of joints with electric spark coatings of BrAZh9-4 and SPS bronze disk samples

Номер сопряжения	Покрытие образца-диска	Материал контр-образца	Вид трения	Показатель прирабатываемости, $\Pi$	Показатели работоспособности, $H$			Коэффициент трения в нормальном режиме, $\mu_0$
					$P_{нп}$	$P_{оп}$	$P_{мп}$	
1.1	ЭИО БрАЖ9-4	Сталь 100Cr6	Сухое	1,02	5	5	9	0,784
1.2	ЭИО БрАЖ9-4	Сталь 100Cr6	Сухое	1,28	5	5	15	1,561
1.3	ЭИО БрАЖ9-4	Сталь 100Cr6	Сухое	2,27	7	3	11	0,588
2.1	ЭИО ИПС бронзой	Сталь 100Cr6	Сухое	2,35	3	5	11	0,681
2.2	ЭИО ИПС бронзой	Сталь 100Cr6	Сухое	1,61	7	3	13	1,245
2.3	ЭИО ИПС бронзой	Сталь 100Cr6	Сухое	3,33	3	3	13	1,001
3.1	ЭИО БрАЖ9-4	Сталь 100Cr6	Граничное	2,31	3	13	40	1,230
3.2	ЭИО БрАЖ9-4	Сталь 100Cr6	Граничное	1,1	5	15	40	2,120
3.3	ЭИО БрАЖ9-4	Сталь 100Cr6	Граничное	3,21	5	9	40	1,213
4.1	ЭИО ИПС бронзой	Сталь 100Cr6	Граничное	2,27	3	13	25	0,747
4.2	ЭИО ИПС бронзой	Сталь 100Cr6	Граничное	0,813	7	15	31	1,969
4.3	ЭИО ИПС бронзой	Сталь 100Cr6	Граничное	1,99	5	9	31	1,453

тания исследуемых сопряжений на износостойкость при определенных для них нагрузках  $P_{оп}$ , результаты которых представили в таблице 4.

Оценку износостойкости материала образцов (покрытий) производили по средней для испытанных образцов интенсивности изнашивания  $I$ , определяемой по формуле:

$$I = W/L, \text{ м/м} \quad (2)$$

где  $W$  – линейный износ образца, м;  $L$  – путь трения, м.

При определении линейного износа  $W$  взвешиванием его оценивали по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F}, \quad (3)$$

где  $\Delta G$  – изменение массы образца при испытании, кг;  $\gamma$  – плотность изношенного материала, кг/м<sup>3</sup>;

Table 4

Результаты испытаний исследуемых сопряжений на износостойкость  
Results of tests of the studied joints for wear resistance

Таблица 4

Номер сопряжения	$P_{on}$	Коэф. трения в нормальном режиме, $\mu_0$	Путь трения, м	Линейный износ образца-диска, $\times 10^{-3}$ мм	Линейный износ контр-образца, $\times 10^{-3}$ мм	Вид трения	Интенсивность изнашивания, $\times 10^{-10}$ , мм/мм	Фактор износа, $\Phi$ $\times 10^{-10}$ мм/мм Н
1.1	5	0,784	5770	2,39	0,071	Сухое	42,6	85,1
1.2	5	1,561	4750,4	0,585	0,087	Сухое	14,1	28,3
1.3	3	0,588	5769	0,807	0,0039	Сухое	14,1	46,9
2.1	5	0,681	6225	0,583	0,743	Сухое	21,3	42,6
2.2	3	1,245	5722,5	2,6	3,67	Сухое	110	365
2.3	3	1,001	5769	0,0352	0,051	Сухое	1,49	4,97
3.1	13	1,230	5770	0,24	0,231	Граничное	8,15	6,27
3.2	15	2,120	5769	0,082	0,05	Граничное	2,29	1,52
3.3	9	1,213	5769	0,053	0,097	Граничное	2,61	2,9
4.1	13	0,747	6225	6,78	0,00008	Граничное	109	83,8
4.2	15	1,969	5769	0,0464	0,000007	Граничное	0,804	0,53
4.3	9	1,453	5769	0,244	0,032	Граничное	4,79	5,32

$F_c$  – контурная площадь контакта образцов,  $m^2$ ;  
 $L$  – путь трения образца, соответствующий износу  $W$ , м:

$$L = N \cdot l, \quad (4)$$

где  $N$  – число циклов, за каждый из которых поверхности трения образца проходят путь  $l$ ;  $l$  – линейный размер поверхности трения сопряженного образца в направлении скольжения, м.

Интенсивность изнашивания пары трения в целом, образца и контр-образца (или для испытаний на трибометре: диска и шарика) определяли как сумму интенсивностей изнашивания  $I_{\Sigma}$  элементов пары.

Сравнительную оценку интенсивностей изнашивания производили по показателю фактора износа  $\Phi$ , определяемого по формуле:

$$\Phi = I_{\Sigma} / P_{on}, \text{ м/мН}. \quad (5)$$

**Выводы.** Анализ результатов триботехнических испытаний «образец–диск с покрытием ЭИО электродом БрАЖ9-4 + шариковый индентор Сталь 100Cr6» и «образец–диск с покрытием ЭИО электродом ИПС бронза + шариковый индентор Сталь 100Cr6» показал, что:

- средний показатель прирабатываемости у сопряжения с покрытием ИПС бронза в условиях сухого трения выше, чем у сопряжения с покрытием ЭИО БрАЖ9-4, в 1,6 раза, а максимальная несущая способность, соответственно, в 1,06 раза;

- показатель прирабатываемости у сопряжения с покрытием ИПС бронза в условиях граничного трения меньше, чем у сопряжения с покрытием

ЭИО БрАЖ9-4, в 1,3 раза, а максимальная несущая способность, соответственно, в 1,2 раза;

- фактор износа у сопряжений с покрытием ИПС бронза в условиях сухого трения выше, чем у сопряжений с покрытием ЭИО БрАЖ9-4, в 2,6 раза, а в условиях граничного трения, соответственно, в 8,4 раза. Проведенные исследования продемонстрировали высокие показатели триботехнических свойств электроискровых покрытий электродами из спеченных порошков (ИПС бронза) для сопряжений, работающих в условиях сухого трения, не уступающих показателям электроискровых покрытий электродами БрАЖ9-4 (в состоянии поставки). Это говорит об актуальности восстановления бронзовых деталей техники переработанными материалами.

Снижение показателей триботехнических свойств исследуемых сопряжений, испытанных в условиях граничного трения вероятно связано с выбором смазки, режимов спекания порошковых материалов, режимов ЭИО и др., что требует проведения дополнительных исследований с определением оптимальных значений указанных показателей.

#### Библиографический список

1. Польшин А.А., Любимый Н.С., Семенов И.В. и др. *Современные методы при ремонте и восстановлении деталей машин для повышения эффективности транспортно-дорожного комплекса // Мир транспорта и технологических машин. 2023. N3-4(82). С. 26-39. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-26-39.*
2. Слинко Д.Б., Чавдаров А.В., Денисов В.А. и др. *Роботизированный комплекс плазменно-порошковой на-*

плавки деталей типа «вал» // *Электromеталлургия*. 2022. N9. С. 9-15. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-9-9-15.

3. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М. и др. Повышение эксплуатационной надежности сельскохозяйственных машин // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4(310). С. 12-16. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16.

4. Романов И.В., Задорожный Р.Н., Кудряшова Е.Ю. Рециклинг бронзовых отходов машиностроительных производств // *Технический сервис машин*. 2023. N2(151). С. 40-47. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-2-40-47.

5. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Алтухов А.Ю. Оценка возможности применения электроэрозионных кобальтохромовых порошков для получения изделий методом аддитивного производства // *Металлург*. 2021. N12. С. 61-64. DOI: 10.52351/00260827\_2021\_12\_61.

6. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С. и др. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь-сталь // *Трение и износ*. 2023. Т. 44. N4. С. 322-334. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.

7. Латыпова Г.Р., Карпенко Н.Н., Латыпов Р.А. и др. Состав и свойства порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов инструментальной быстрорежущей стали P18 // *Электromеталлургия*. 2020. N3. С. 25-29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-3-25-29.

8. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В., Карачевцев Ф.Н. и др. Жаростойкость медно-никелевых сплавов, синтезированных искровым плазменным спеканием // *Перспективные материалы*. 2021. N10. С. 47-55. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-10-47-55.

9. Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Дорохов А.С. и др. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования // *Вестник Мордовского университета*. 2018. Т. 28. N3. С. 302-320. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320.

10. Федотов А.В., Дорохов А.С., Гвоздев А.А. Триботехнические материалы для технического обслуживания сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. N4(149). С. 37-45. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.

## References

1. Pol'shin A.A., Lyubimiy N.S., Semenov I.V., et al. Modern methods for the repair and restoration of machine parts to increase the efficiency of the transport and road complex. *The world of transport and technological machines*. 2023. N3-4(82). 26-39 (In Russian). DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-26-39.

2. Slinko D.B., Chavdarov A.V., Denisov V.A., et al.

Robotic complex of plasma-powder surfacing of "shaft" type parts. *Elektrometallurgiya*. 2022. N9. 9-15 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-9-9-15.

3. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M., et al. Improving the operational reliability of agricultural machines. *Machinery and equipment for the village*. 2023. N4(310). 12-16 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16.

4. Romanov I.V., Zadorozhnyi R.N., Kudryashova E.Yu. Recycling of bronze waste in machine-building industry. *Machinery technical service*. 2023. N2(151) (In Russian). 40-47. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-2-40-47.

5. Ageev E.V., Ageeva E.V., Altukhov A.Yu. Evaluation of possibility of using electroerosive cobalt-chromium powders for production of products by method of additive manufacturing. *Metallurgist*. 2021. N12. 61-64 (In Russian). DOI: 10.52351/00260827\_2021\_12\_61.

6. Arkhipov V.E., Kuksenova L.I., Pugachev M.S., et al. Influence of surface layers modified with copper on the performance of steel-steel sliding friction couples. *Friction and wear*. 2023. Vol. 44. N4. 322-334 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334.

7. Latypova G.R., Karpenko N.N., Latypov R.A., et al. Composition and properties of powder made by electroerosion dispersion of waste of high-speed tool steel R18. *Elektrometallurgiya*. 2020. N3. 25-29 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-3-25-29.

8. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V., Karachevtcev F.N., et al. High-temperature oxidation of the copper-nickel based alloys synthesized by spark plasma sintering. *Perspektivnye materialy*. 2021. N10. 47-55 (In Russian). DOI: 10.30791/1028-978X-2021-10-47-55.

9. Verkhoturorov A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., et al. Effect of the nature of electrode materials on erosion and properties of doped layers. Criteria for evaluating the effectiveness of electrospark alloying. *Mordovia university bulletin*. 2018. Vol. 28. N3. 302-320 (In Russian). DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320.

10. Fedotov A.V., Dorokhov A.S., Gvozdev A.A. Tribotechnical materials for the maintenance of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2022. N4(149). 37-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023

Статья принята к публикации 29.01.2024

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЯМИ С ДИСУЛЬФИДОМ МОЛИБДЕНА



<sup>1</sup>Екатерина Владимировна Агеева, доктор технических наук,  
профессор e-mail: ageeva-ev@yandex.ru;

<sup>1</sup>Вадим Владимирович Серебровский, доктор технических наук, профессор

<sup>2</sup>Владимир Анатольевич Семькин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

<sup>1</sup>Ольга Сергеевна Серникова, аспирант

<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация

Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030»

**Реферат.** Одним из наиболее универсальных и гибких технологических приемов воздействия на свойства обрабатываемых поверхностей служит метод электролитического осаждения композиционных материалов. Анализ современной научно-технической литературы показал, что недостаточно рассмотрены вопросы восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки (Цель исследования) Усовершенствовать технологию восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением в качестве твердой смазки дисульфида молибдена. (Материалы и методы) Осуществили электроосаждение композиционных покрытий из электролитов-суспензий с добавлением дисульфида молибдена на гальванической установке LI DIGIT. Указали технологические параметры электроосаждения: плотность тока 20 ампер на квадратный дециметр, время осаждения 60 минут и концентрация дисульфида молибдена 5 грамм на литр. (Результаты и обсуждение) Разработали, апробировали и исследовали новую технологию восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки, эффективность которой подтверждается свойствами покрытий: микроструктура покрытия имеет мелкозернистое строение, без включений; равномерное распределение фаз и отсутствие пор, трещин и несплошностей; элементы Fe, Mo и S в покрытии распределены равномерно; в покрытии присутствуют фазы карбидов Fe и MoS<sub>2</sub>; коэффициент трения покрытий на пути трения 500 метров составляет менее 0,1. Предложенная технология восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники позволяет обеспечить необходимые триботехнические свойства покрытий. (Выводы) Результаты стендовых испытаний показали, что ресурс деталей, восстановленных и упрочненных композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки, выше ресурса новых деталей в 1,22 раза.

**Ключевые слова:** изношенная деталь, восстановление и упрочнение, композиционное гальваническое покрытие, свойства покрытия, микроструктура, износостойкость поверхности.

**Для цитирования:** Агеева Е.В., Серебровский В.В., Семькин В.А., Серникова О.С. Восстановление деталей автотракторной техники гальванопокрытиями с дисульфидом молибдена // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 80-85 DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-80-85. EDN: RAKEBU.

Research article

## RESTORATION OF PARTS OF AUTOMOTIVE EQUIPMENT BY ELECTROPLATING WITH MOLYBDENUM DISULFIDE

<sup>1</sup>Ekaterina V. Ageeva, Dr.Sc.(Eng.), professor;



The work was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwestern State University" of the strategic academic leadership program "Priority 2030"

**Abstract.** One of the most versatile and flexible technological methods of influencing the properties of the treated surfaces is the method of electrolytic deposition of composite materials. The analysis of modern scientific and technical literature has shown that the issues of restoration and hardening of worn parts of automotive equipment by composite electroplating with the use of molybdenum disulfide as a solid lubricant have not been sufficiently considered (Research purpose) The research purpose is improving the technology of restoration and hardening of worn parts of automotive equipment by composite electroplating with molybdenum disulfide as a solid lubricant. (Materials and methods) Electrodeposition of composite coatings from electrolytes-suspensions with the addition of molybdenum disulfide was carried out on the L1 DIGIT electroplating unit. The technological parameters of electrodeposition were indicated: a current density of 20 amperes per square decimeter, a deposition time of 60 minutes and a concentration of molybdenum disulfide of 5 grams per liter. (Results and discussion) We developed, tested and investigated a new technology for restoring and hardening worn parts of automotive equipment with composite electroplating using molybdenum disulfide as a solid lubricant, the effectiveness of which is confirmed by the coating properties: the microstructure of the coating has a fine-grained structure, without inclusions; uniform phase distribution and absence of pores, cracks and discontinuities; elements Fe, Mo and S in the coating They are distributed evenly; the phases of Fe and MoS<sub>2</sub> carbides are present in the coating; the coefficient of friction of coatings on a friction path of 500 meters is less than 0.1. The proposed technology for restoring and hardening worn parts of automotive equipment makes it possible to provide the necessary tribotechnical properties of coatings. (Conclusions) The results of bench tests showed that the life of parts restored and hardened with composite electroplating using molybdenum disulfide as a solid lubricant is 1.22 times higher than the life of new parts.

**Keywords:** worn part, restoration and hardening, composite electroplating, coating properties, microstructure, surface wear resistance.

**For citation:** Ageeva E.V., Serebrovsky V.V., Semykin V.A., Sernikova O.S. Restoration of parts of automotive equipment by electroplating with molybdenum disulfide. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 80-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-80-85. EDN: RAKEBU.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» поставлена стратегическая задача укрепления производственной безопасности, которая напрямую связана с ресурсосбережением и импортозамещением [1, 2].

Одна из основных задач развития современного сельхозмашиностроения заключается в повышении качества, надежности и долговечности деталей, узлов и механизмов. Важной причиной выхода их из строя служит износ. При большом многообразии видов и механизмов изнашивания в сельхозмашиностроении актуальная задача заключается в повышении качества деталей, работающих в условиях абразивного (и коррозионно-абра-

зивного) изнашивания, характерного для рабочих деталей автотракторной техники [3].

Эта проблема может быть решена за счет применения эффективных методов поверхностного упрочнения при восстановлении деталей путем применения износостойких материалов, обеспечивающих получение покрытия с заданными физическо-механическими свойствами [4, 5].

Одним из наиболее универсальных и гибких технологических приемов воздействия на свойства обрабатываемых поверхностей в качестве метода восстановления и упрочнения деталей с большой степенью износа (0,3 мм и более), работающих в условиях интенсивного изнашивания, является электролитическое осаждение композиционных материалов [6]. Анализ современной научно-тех-

нической литературы, направленной на изучение данной проблематики показал, что недостаточно рассматриваются вопросы восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями (КГП) с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки [7, 8].

**Цель исследования** – усовершенствовать технологию восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением в качестве твердой смазки дисульфида молибдена.

**Материалы и методы.** Электроосаждение композиционных покрытий из электролитов-суспензий с добавлением дисульфида молибдена осуществляли на гальванической установке *LI DIGIT* (Италия) (рис. 1).

Технологические параметры электроосаждения: плотность тока 20 А/дм<sup>2</sup>, время осаждения 60 мин. и концентрации дисульфида молибдена 5 г/л [9].



Рис. 1. Установка для электроосаждения композиционных покрытий

Fig. 1. Installation for electrodeposition of composite coatings

Поставленные в работе задачи по изучению свойств композиционных гальванических покрытий решали с использованием современного оборудования и взаимодополняющих методов физического материаловедения, в том числе: механическую обработку покрытий проводили на автоматическом высокоточном настольном отрезном станке *Accutom-5* (Дания) и шлифовально-полировальном станке *LaboPol-5* (Дания); микроструктуру покрытий исследовали на оптическом инвертированном микроскопе *OLYMPUS GX51* (Япония); рентгеноспектральный микроанализ покрытий проводили на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы *EDAX* (Нидерланды), встроенном в растровый электронный микроскоп *QUANTA 200 3D* (Нидерланды); фазовый анализ покрытий выполняли на рентгеновском дифрактометре *Rigaku Ultima IV* (Япония); износостойкость образцов покрытий исследовали по стандартной схеме испытания «шарик-диск» на ав-

томатизированной машине трения *Tribometer, CSM Instruments* (Швейцария) и др.

**Результаты и обсуждение.** Микроструктуру покрытий исследовали на оптическом инвертированном микроскопе *OLYMPUS GX51* (Япония). Анализ микроструктуры покрытия показал, что она имеет мелкозернистое строение без включений, равномерное распределение фаз и отсутствие значительных пор, трещин и несплошностей (рис. 2) [10].

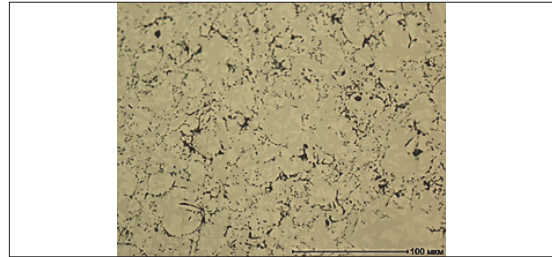


Рис. 2. Микроструктура покрытия

Fig. 2. The microstructure of the coating

Рентгеноспектральный микроанализ покрытия проводили на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы *EDAX* (Нидерланды), встроенном в растровый электронный микроскоп *QUANTA 200 3D* (Нидерланды).

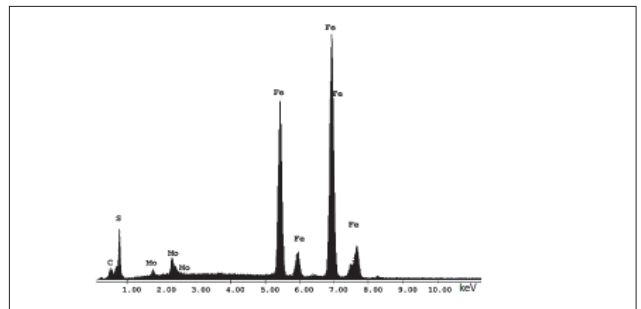


Рис. 3. Спектрограмма элементного состава покрытия

Fig. 3. Spectrogram of the elemental composition of the coating

На основе анализа спектрограмм элементного состава установили, что элементы *Fe*, *Mo* и *S* в покрытии распределены равномерно (рис. 3).

Фазовый анализ КГП выполняли на рентгеновском дифрактометре *Rigaku Ultima IV* (Япония). Анализ дифрактограмм фазового состава исследуемых покрытий показал наличие в них фаз *Fe* и *MoS<sub>2</sub>* (рис. 4).

Исследования износостойкости поверхности плазменных покрытий были проведены по стандартной схеме испытания «шарик-диск» на автоматизированной машине трения *Tribometer, CSM Instruments*. Экспериментально установили, что коэффициент трения покрытий на пути трения 500 м составляет менее 0,1.

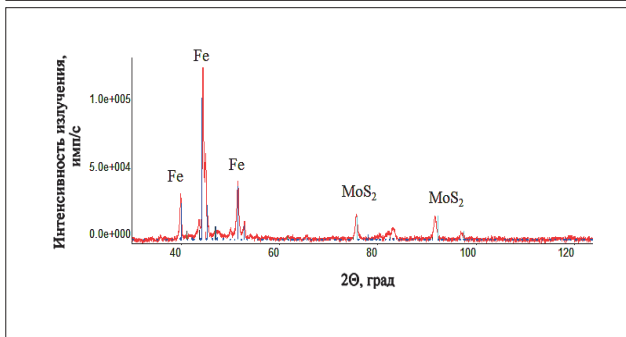


Рис. 4. Дифрактограмма фазового состава покрытия  
Fig. 4. Diffractogram of the phase composition of the coating

Низкое значение коэффициента трения КГП обеспечивается наличием дисульфида молибдена в качестве твердой смазки. Отметим, что в первоначальный момент трения контртела (шарика) об испытываемую поверхность происходит скачок коэффициента трения [11].

В данном случае это связано с относительно высокой шероховатостью и скачок происходит по причине сглаживания твердых выступов поверхности образца (рис. 5).



Рис. 5. Коэффициент трения покрытия  
Fig. 5. Friction coefficient of the coating

Расчет экономической эффективности внедрения технологического процесса восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки выполнили на примере шкворня с годовой программой 80 шт. в год:

$$\mathcal{E} = [h \cdot C_n \cdot K_{np} - (C_{вос} + E_n \cdot K)] \cdot N_{вос},$$

где  $h$  – коэффициент, учитывающий затраты по доставке деталей на ремонтное предприятие, равен 1,1;  $C_n$  – оптовая цена производства нового шкворня, руб.;  $K_{np}$  – коэффициент приведения цены шкворня, восстановленного рекомендуемым способом к цене нового шкворня;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,

$E_n = 0,15$ ;  $N_{вос}$  – годовая программа восстановления стрельчатых лап, шт;  $K$  – удельные капитальные вложения, руб.

$$\mathcal{E} = [h \cdot C_n \cdot K_{np} - (C_{вос} + E_n \cdot K)] \cdot N_{вос} = [1,1 \cdot 500 \cdot 0,91 - (50 + 0,15 \cdot 400)] \cdot 80 = (500,5 - 110) \cdot 80 = 31240 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от внедрения предложенного технологического процесса восстановления шкворня в ООО «Краснополянская сельхозтехника» Курска при программе 80 шт./год составил 31240 руб.

Результаты стендовых испытаний также показали, что ресурс изношенных деталей автотракторной техники, восстановленных и упрочненных композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки выше, ресурса новых деталей в 1,22 раза [12, 13].

Таким образом, даже на малых предприятиях с небольшими программами восстановления шкворня экономический эффект от применения разработанного нового технологического проекта весьма значительный [14].

**Выводы.** Разработали, апробировали и исследовали новую технологию восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки, эффективность которой подтверждается свойствами покрытий [15]:

- микроструктура покрытия имеет мелкозернистое строение, без включений, равномерное распределение фаз и отсутствие пор, трещин и несплошностей;

- элементы  $Fe$ ,  $Mo$  и  $S$  в покрытии распределены равномерно;

- в покрытии присутствуют фазы карбидов  $Fe$  и  $MoS_2$ ;

- коэффициент трения покрытий на пути трения 500 м составляет менее 0,1.

Предложенная технология восстановления и упрочнения изношенных деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки позволяет обеспечить необходимые триботехнические свойства покрытий.

Результаты стендовых испытаний показали, что ресурс изношенных деталей автотракторной техники восстановленных и упрочненных композиционными гальваническими покрытиями с применением дисульфида молибдена в качестве твердой смазки выше ресурса новых деталей в 1,22 раза.



Экономической эффект от внедрения предложенного технологического процесса восстановления шкворня в ООО «Краснополянская сельхозтехника» Курска при программе 80 шт./год составил 31240 руб.

### Библиографический список

1. Мельников А.Б., Скоморощенко А.А. Проблемы реализации политики импортозамещения сельскохозяйственной техники в России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023. N1(105). С. 75-81. DOI: 10.33938/2311-75.

2. Ганиева И.А. Создание агроинжиниринговых центров для импортозамещения сельскохозяйственной техники и пищевого оборудования для агропромышленного комплекса // АПК: экономика, управление. 2023. N9. С. 56-60. DOI: 10.33305/239-56.

3. Бабкин К.А. Основные тенденции развития отечественного сельхозмашиностроения // АПК: экономика, управление. 2023. N1. С. 15-24. DOI: 10.33305/231-15.

4. Игнатов В.И., Катаев Ю.В., Герасимов В.С. и др. Возможности повышения конкурентоспособности предприятий сельхозмашиностроения // Технический сервис машин. 2021. Т. 59. N2(143). С. 110-119. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-2-110-118.

5. Герасимов В.С., Игнатов В.И. Возможные варианты развития сельхозмашиностроения // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2020. N5. С. 73-80. DOI: 10.33920/sel-10-2005-11.

6. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Фарафонов Д.П. и др. Особенности электролитического осаждения абразивно-износостойких покрытий на основе никеля // Труды ВИАМ. 2022. N2(108). С. 99-110. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.

7. Задорожний Р.Н., Романов И.В., Зуевский В.А. и др. Применение вторичных твердосплавных порошков для восстановления и упрочнения деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. N2(218). С.77-80. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-2-77-80.

8. Зуевский В.А., Задорожний Р.Н., Романов И.В. Использование порошковых материалов в технологиях восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2021. Т. 59. N4(145). С. 180-190. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-180-190.

9. Задорожний Р.Н., Романов И.В. Повышение износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин вторичными твердосплавными материалами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. N1(205). С. 24-27. DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-1-24-27.

10. Ageeva E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electro-

dispersion of T5K10 alloy in water. Metallurgist. 2022. Vol. 66. N1-2. 146-154. DOI: 10.52351/00260827\_2022\_02\_39.

11. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Соломашкин А.А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин // Технический сервис машин. 2020. Т. 58. N1(138). С. 50-57. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57.

12. Янута А.С. Исследование влияния режимов осаждения на структуру электролитического бинарного покрытия Fe-Cr, полученного из сульфатно-хлоридного электролита // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2022. N3(70). С. 17-21. EDN: PMMMMH.

13. Latypov R.A., Ageeva E.V., Latypova G.R. Properties of the composite galvanic coatings fabricated using the dispersed wastes of shkh15 steel. Russian Metallurgy (Metally). 2019. N6. 632-635. DOI: 10.1134/S0036-029519060144.

14. Волкова И.Р., Тырышкина Л.Е., Волочаев М.Н. и др. Влияние порошков оксида алюминия на структуру и свойства медных композиционных гальванических покрытий // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2023. Т. 59. N1. С. 39-44. DOI: 10.31857/S0-044185622700024.

15. Корнеев С.В., Пашукевич С.В. Влияние гранулометрического состава дисульфида молибдена на смазывание подшипников качения // Омский научный вестник. 2023. N2(186). С. 13-18. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-13-18.

### References

1. Melnikov A.B., Skomoroshchenko A.A. Problems of implementation of the policy of import substitution of agricultural machinery in Russia. Economics, labor, management in agriculture. 2023. N1(105). 75-81 (In Russian). DOI: 10.33938/2311-75.

2. Ganieva I.A. Creation of agro-engineering centers for import substitution of agricultural machinery and food equipment for the agro-industrial complex. AIC: economics, management. 2023. N9. 56-60 (In Russian). DOI: 10.33305/239-56.

3. Babkin K.A. The main trends in the development of domestic agricultural machinery. Main trends of domestic development agricultural mechanical engineering. AIC: economics, management 2023. N1. 15-24 (In Russian). DOI: 10.33305/231-15.

4. Ignatov V.I., Katayev Yu.V., Gerasimov V.S., et al. Opportunities for improving the competitiveness of agricultural machinery enterprises. Machinery technical service. 2021. Vol. 59. N2(143). 110-119 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-2-110-118.

5. Gerasimov V.S., Ignatov V.I. Possible options for the development of agricultural machinery. Agricultural machinery: maintenance and repair. 2020. N5. 73-80 (In



Russian). DOI: 10.33920/sel-10-2005-11.

6. Salakhova R.K., Tikhoobrazov A.B., Farafonov D.P., et al. Features of electrolytic deposition of abrasive-wear-resistant nickel-based coatings. *Proceedings of VIAM*. 2022. N2(108). 99-110 (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.

7. Zadorozhny R.N., Romanov I.V., Zuevsky V.A., et al. Application of secondary carbide powders for restoration and hardening of parts. *Strengthening technologies and coatings*. 2023. Vol. 19. N2(218). 77-80 (In Russian). DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-2-77-80.

8. Zuyevskiy V.A., Zadorozhniy R.N., Romanov I.V. The use of powder materials in the technologies of restoration and hardening of agricultural machinery parts. *Machinery technical service*. 2021. Vol. 59. N4(145). 180-190 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-180-190.

9. Zadorozhny R.N., Romanov I.V. Increasing the wear resistance of the working bodies of agricultural machines with secondary carbide materials. *Strengthening technologies and coatings*. 2022. Vol. 18. N1(205). 24-27 (In Russian). DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-1-24-27.

10. Ageeva E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water. *Metallurgist*. 2022. Vol. 66. N1-2. 146-154. DOI: 10.52351/00260827\_2022\_02\_39.

11. Chernoiivanov V.I., Denisov V.A., Solomashkin A.A. How to determine the remaining life of machine parts. *Machinery technical service*. 2020. Vol. 58. N1(138). 50-57 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57.

12. Yanuta A.S. Investigation of the effect of deposition modes on the structure of an electrolytic binary Fe-Cr coating obtained from a sulfate-chloride electrolyte. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI)*. 2022. N3(70). 17-21 (In Russian). EDN: PMMMMH.

13. Latypov R.A., Ageeva E.V., Latypova G.R. Properties of the composite galvanic coatings fabricated using the dispersed wastes of shkh15 steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. N6. 632-635. DOI: 10.1134/S0036029519060144.

14. Volkova I.R., Tyryshkina L.E., Volochaev M.N., et al. Influence of aluminum oxide powders on the structure and properties of copper composite electroplating coatings. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2023. Vol.59. N1. 39-44 (In Russian). DOI: 10.31857/S00-44185622700024.

15. Korrneev S.V., Pashukevich S.V. The influence of granulometric composition of molybdenum disulfide on lubrication of rolling bearings. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. N2(186). 13-18 (In Russian). DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-13-18.

#### Заявленный вклад соавторов

Агеева Е.В. – подготовка текста, анализ литературных данных;

Серебровский В.В. – анализ результатов исследования;

Семькин В.А. – интерпретация результатов исследования;

Серникова О.С. – получение экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Contributions of the coauthors

Ageeva E.V. – preparation of the manuscript, analysis of literary data;

Serebrovsky V.V. – analysis of research results;

Semykin V.A. – interpretation of research results;

Sernikova O.S. – obtaining experimental data.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 22.12.2023

Статья принята к публикации 01.02.2024

## АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ



*Роман Николаевич Задорожний, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;  
Елизавета Юрьевна Кудряшова, кандидат технических наук, научный сотрудник,  
e-mail: gosniti1953@mail.ru;  
Илья Владимирович Романов, младший научный сотрудник*

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация*

**Реферат.** В структуре агропромышленного комплекса России значимую роль занимают перерабатывающие и пищевые производства, а также животноводство. Специфика работы в этих отраслях подразумевает постоянный контакт деталей оборудования с агрессивными средами, за счет чего механический износ усиливается коррозионным износом. В перерабатывающем, пищевом производстве и животноводстве задача усложняется еще и тем, что к материалам, контактирующим с продуктами, предъявляются особые санитарно-гигиенические требования. (Цель исследования) Изучить материалы, применяемые для изготовления деталей, работающих в условиях агрессивных сред в животноводстве и перерабатывающем производстве; выявить наиболее характерные дефекты в процессе эксплуатации; предложить аналоги материалов для ремонта и восстановления. (Материалы и методы) Использовали литературные и патентные источники, изучили принцип и условия работы доильных установок и упаковочных машин. (Результаты и обсуждение) Указали, что применение материалов, из которых изготовлены детали оборудования в перерабатывающем и пищевом производстве, определяется такими факторами, как нейтральность материала к продукту, нейтральность продукта к материалу, работоспособность в рамках технологического процесса. Отметили, что наиболее универсальные материалы по прочности, жесткости, термостойкости, коррозионной стойкости, низкой стоимости, высоким гигиеническим свойствам – коррозионностойкие стали. Однако и такие материалы со временем изнашиваются в результате механического износа, который усиливается коррозией. Чаще всего страдают направляющие, приводные ролики и диски, которые испытывают на себе нагрузки в виде трения. (Выводы) В оборудовании перерабатывающего и пищевого производств, а также в животноводстве чаще всего применяют детали из коррозионностойких сталей. Восстанавливать такие детали целесообразно с помощью лазерных технологий или плазменно-порошковой наплавки, так как легированные стали плохо поддаются свариванию.

**Ключевые слова:** агрессивные среды, коррозионный износ, перерабатывающее производство, коррозионностойкие стали, износ направляющих.

**Для цитирования:** Задорожний Р.Н., Кудряшова Е.Ю., Романов И.В. Анализ материалов деталей, работающих в агрессивных средах перерабатывающих производств // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №4. С. 86-93. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-86-93. EDN: RWZAAA.

Research article

## ANALYSIS OF MATERIALS WORKING IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS OF PROCESSING INDUSTRIES

*Roman N. Zadorozhny, Ph.D.(Eng.), leading researcher;  
Elizaveta Yu. Kudryashova, Ph.D.(Eng.), research assistant;  
Ilya V. Romanov, junior researcher*

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** Processing and food industries, as well as animal husbandry, play a significant role in the structure of the agro-industrial complex of Russia. The specifics of working in these industries imply constant contact of equipment parts with aggressive environments, due to which mechanical wear is enhanced by corrosion wear. In processing, food production and animal husbandry, the task is further complicated by the fact that special sanitary and hygienic requirements are imposed on materials in contact with products. (Research purpose) The research purpose is studying the materials used for the manufacture of parts operating in aggressive environments in animal husbandry and processing production; identifying the most characteristic defects during operation; offering analogues of materials for repair and restoration. (Materials and methods) Used literary and patent sources, studied the principle and working conditions of milking machines and packaging machines. (Results and discussion) It was pointed out that the use of materials from which equipment parts are made in processing and food production is determined by such factors as the neutrality of the material to the product, the neutrality of the product to the material, the operability within the technological process. It was noted that the most versatile materials in terms of strength, rigidity, heat resistance, corrosion resistance, low cost, high hygienic properties are corrosion-resistant steels. However, such materials also wear out over time as a result of mechanical wear, which is enhanced by corrosion. Most often, guides, drive rollers and discs suffer, which experience loads in the form of friction. (Conclusions) In the equipment of processing and food production, as well as in animal husbandry, parts made of corrosion-resistant steels are most often used. It is advisable to restore such parts using laser technologies or plasma-powder surfacing, since alloyed steels are difficult to weld.

**Keywords:** aggressive environments, corrosive wear, processing industry, corrosion-resistant steels, wear of guides.

**For citation:** Zadorozhnyi R.N., Kudryashova E.Yu., Romanov I.V. Analysis of materials working in aggressive environments of processing industries. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 86-93 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-86-93. EDN: RWZAAA.

**И**нтенсивное развитие агропромышленного комплекса страны, наблюдаемое в последние годы, требует все более широкого применения различного специализированного перерабатывающего оборудования. Однако важнейшие позиции перерабатывающего оборудования агропромышленного комплекса (АПК) занимают зарубежные механизмы и машины или собранные в России из импортных комплектующих [1].

Эксплуатация такого оборудования сопряжена с рядом сложностей: отсутствие своевременного ремонта из-за нехватки запасных частей, отсутствие ремонтной технологической документации, приобретение комплектующих только у импортных производителей по высокой стоимости и многое другое.

Проведенный анализ показал, что до 90% деталей сельскохозяйственных машин и перерабатывающего оборудования АПК выходит из строя вследствие таких износов, как абразивное, ударно-абразивное, гидроабразивное, коррозионно-механическое, окислительное изнашивание. При этом 75% из них ремонтнопригодны [2].

Для выбора наиболее оптимальной технологии восстановления деталей, работающих в агрессив-

ных средах перерабатывающих производств, требуется понимать, какие материалы используются для их изготовления и каким разрушающим воздействиям они подвергаются.

Универсальными материалами по таким параметрам как прочность, жесткость, термостойкость, коррозионностойкость, низкая стоимость, а также гигиеническим, механическим и технологическим параметрам, и которые разрешены Минздравом как контактирующие с пищевыми продуктами и средами в изделиях продовольственного машиностроения, являются коррозионностойкие стали [3].

В связи с чем изготовление порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования для процессов восстановления изношенных деталей пищевого и перерабатывающего производств целесообразно производить из пищевых нержавеющей сталей, примером такой стали служит сталь марки 08X13 ГОСТ 5949-75.

К оборудованию для перерабатывающей и пищевой промышленности изначально предъявляются повышенные требования к выбору материала, из которого оно будет произведено. Помимо требований по устойчивости к химическому, физическому и термическому воздействию, исполь-

зыемые материалы также должны соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям на всем протяжении эксплуатации, что связано с охраной здоровья потенциальных потребителей [4].

**Цель исследования** – изучить материалы, применяемые для изготовления деталей, работающих в условиях агрессивных сред в животноводстве и перерабатывающем производстве; выявить наиболее характерные дефекты в процессе эксплуатации; предложить аналоги материалов для ремонта и восстановления.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи использовался комплексный подход, который включал анализ литературных и патентных источников. Анализировались конструкции и условия работы доильных установок и упаковочных машин непосредственно на производстве.

**Результаты и обсуждение.** При рассмотрении процесса взаимодействия сырья и материалов, из которых производят перерабатываемое и пищевое оборудование, учитываются следующие факторы:

- нейтральность материала по отношению к обрабатываемому продукту (отсутствие воздействия пищевого продукта на материал);
- нейтральность продукта к воздействию на него материала;
- работоспособность материала в рамках технологического процесса [5].

Материалы, используемые в технологическом оборудовании пищевого и перерабатывающего производств, можно условно разделить на четыре основные группы:

- конструкционные материалы для деталей оборудования, не имеющего прямых контактов с пищевым сырьем или продуктом;
- материалы для деталей оборудования, имеющего непосредственный контакт с перерабатываемым сырьем или пищевым продуктом;
- наружные защитные покрытия для деталей, имеющих контакт с сырьем, пищевым продуктом, моющими или дезинфицирующими средствами;
- упаковочные материалы для потребительской и транспортной тары [6].

Литые корпусные детали, шнеки, камеры обработки часто изготавливают из серого чугуна. Для сварных корпусных деталей, кожухов, крышек применяется углеродистая сталь. Детали механизмов и редукторов – зубчатые колеса, валы, оси также изготавливаются из качественной углеродистой стали. Углеродистые или легированные инструментальные стали и отбеленный чугун используют в

основном для изготовления режущих инструментов, жерновов и других рабочих органов с обязательным гальваническим покрытием.

Детали технологического оборудования, непосредственно контактирующие с перерабатываемыми продуктами, подвергающиеся санитарной обработке агрессивными моющими и дезинфицирующими средствами и работающие при высокой температуре, изготавливаются из высоколегированных, коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов. Однако наибольшее распространение при изготовлении оборудования для производства, хранения и транспортирования пищевой продукции получили коррозионностойкие стали, так как они обладают высокими гигиеническими, механическими и технологическими свойствами, кроме того, они имеют привлекательный внешний вид. При этом для экономии никеля, как одного из основных легирующих элементов от коррозии разработано большое количество марок коррозионностойкой стали.

Коррозионностойкие стали – это так называемые атмосферо-коррозионностойкие низколегированные стали и собственно коррозионностойкие стали, применяемые для изготовления оборудования, работающего в контакте с агрессивными средами в химической промышленности и других отраслях техники. Независимо от класса стали содержат не менее 13% хрома [7].

Перечень наиболее распространенных отечественных марок коррозионностойких сталей, применяемых в промышленности, представили в *таблице*.

Стали аустенитного класса по масштабам использования – наиболее важный класс коррозионностойких сталей. Их преимущества, кроме коррозионной стойкости, – высокая пластичность и вязкость. Эти стали имеют хорошую свариваемость и литейные свойства. При холодной пластической деформации аустенитные стали интенсивно наклепываются.

Недостатком аустенитных сталей служит склонность к межкристаллитной коррозии, коррозионному растрескиванию и точечной коррозии [8].

Для уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии аустенитные стали дополнительно легируют титаном и ниобием или уменьшают в них содержание углерода ниже 0,1%. Аустенитные стали, содержащие более 30-40% никеля, стойки к коррозионному растрескиванию. Введение 2-3% молибдена уменьшает шероховатость поверхности и повышает структурную и химическую одно-



родность. Стали ферритного класса содержат 0,08-0,15% углерода и 15-30% хрома. Они уступают аустенитным сталям по всему комплексу механических свойств за исключением сопротивления коррозионному растрескиванию. После нагрева выше 1000-1100 °С стали охрупчиваются, что затрудняет сварку. Существенного улучшения стойкости ферритных сталей к местным видам коррозии добиваются путем применения современных методов очистки от атомов внедрения и серы [9].

Стали аустенитно-ферритного класса имеют практически равное содержание аустенита и феррита, которое обеспечивается закалкой с температурой 1000-1100°С. Они дешевле аустенитных, прочнее их в 1,5-2 раза, менее склонны к коррозионному растрескиванию.

Стали мартенситного класса в отожженном состоянии имеют удовлетворительную стойкость против коррозии. Прочность увеличивается после закалки и отпуска. Мартенситные стали используют для деталей и инструментов, подвергающихся воздействию слабоагрессивных сред: воды, влажного воздуха, разбавленных растворов кислот и солей. Азотсодержащие мартенситные стали типа 05X16H4AB при высокой прочности ( $\sigma_B = 1500$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1365$  МПа) и пластичности ( $\delta = 20\%$ ) обладают высокой коррозионной стойкостью [10].

Стали аустенитно-мартенситного класса по сравнению со сталями аустенитного класса име-

ют более высокую прочность, которая достигается сложной термической обработкой, включающей закалку, обработку холодом и старение.

К коррозионностойким сталям примыкают сплавы на железоникелевой основе 06ХН28МДТ, ОЗХН28МДТ, 06ХН28МТ, отличающиеся высокой стойкостью в серной и фосфорной кислотах, а также в ряде других агрессивных сред.

Наряду со сталями и чугунами в перерабатывающей и пищевой промышленности широко используются цветные металлы и их сплавы: алюминий, титан, медь, бронза, латунь и многие другие. Эти металлы используют для производства основных и вспомогательных деталей пищевых машин, механизмов и аппаратов, для изготовления трубопроводов и емкостного оборудования.

Пищевой алюминий применяют для изготовления облегченных корпусов машин и механизмов, рабочих камер, загрузочных и разгрузочных устройств, рабочих органов, для упаковки пищевых продуктов и т. п. В большинстве случаев участки рабочих камер и рабочих органов, соприкасающихся с пищевыми продуктами, подвергают горячему лужению пищевым оловом.

Для изготовления насосов, клапанов, прессов, трубопроводов применяют титан и его сплавы, стойкость которых к пищевым средам зачастую выше, чем стойкость высоколегированных сталей, кроме того, для изготовления оборудования, дли-

Таблица		Table
Структурные классы коррозионностойких сталей / Structural classes of corrosion resistant steels		
Структурный класс	Марка	Область применения
Ферритный	08X13, 08X18T1	Изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред при комнатной температуре
	15X25T	Детали, не подвергающиеся действию ударных нагрузок, работающие в средах окислительного характера
Аустенитный	08X18H10T	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах типа азотной кислоты
	08X17H13M2T	Сварная аппаратура, работающая в кислотопьющей фосфорной, серной, 10%-ной уксусной кислоте и серноокислых средах
	10X14Г14H4T	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах слабой агрессивности, а также при температурах до 253°С
	03X21H21M	Сварная аппаратура по производству фосфорных удобрений
Аустенито-ферритный	08X22H6T	Сварная аппаратура в химической, пищевой и других отраслях
	088X21H6M2T	Заменитель стали 10X17H13M2T
Мартенситный	20X13, 30X13, 40X13	Режущий, измерительный и хирургический инструмент, упругие элементы, предметы домашнего обихода
Аустенито-мартенситный	07X16H6	Высокопрочные штамповые конструкции и детали, работающие в слабоагрессивных условиях
	08X17H5M3	Нагруженные детали, работающие в атмосферных условиях, слабоагрессивных условиях восстановительного характера
Мартенсито-ферритный	12X13	Предметы домашнего обихода, изделия, работающие в слабоокислительных условиях
	14X17H2	Нагруженные детали, работающие в слабоагрессивных условиях окислительного характера в авиационной, химической промышленности

тельно контактирующего с пищевыми средами (сусло, вино, коньячный спирт), используют титан и его сплавы [11].

Учитывая высокую стойкость титана, применяют плакирование титаном стальных деталей.

Для изготовления оборудования и арматуры, контактирующих с продуктами, а также в антифрикционных парах применяются сплавы на основе меди – непосредственно медь, бронзы, латуни, баббиты.

Однако в отличие от коррозионностойких сталей на цветные металлы и сплавы распространяется регламент, который для каждого вида продукта определяет разрешенные меры в использовании материалов. Например, медь разрешена к применению в кондитерском оборудовании, но запрещена к применению в технологическом оборудовании молочных заводов. Алюминий допускается к применению в молочной промышленности в целом, однако запрещено его использование в пищевом оборудовании, предназначенном для производства молочных продуктов для детского питания.

В перерабатывающей и пищевой промышленности помимо металлов и сплавов активно применяются пищевые полимеры как в качестве конструкционных материалов, так и в качестве покрытий для машин и аппаратов. Наибольшее распространение среди них получили текстолит (шестерни, втулки, подшипники и т. п.), тефлон (прокладки, электроизоляция), фторопласт-4 (матрицы к макаронным прессам, отделка валков для раскатки теста), капрон (зубчатые колеса, втулки и т. п.) и другие полиамиды, пищевая резина и др. Кроме того, широкое распространение пищевые полимеры получили в качестве упаковочного материала [12].

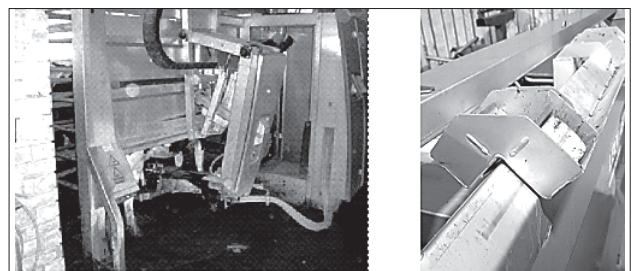
Как показал обзор литературных источников, наиболее универсальный материал по таким параметрам, как прочность, жесткость, термостойкость, коррозионная стойкость, низкая стоимость, – коррозионностойкие стали. В то же время комплексная оценка взаимодействия пищевых продуктов и различных материалов проводится органами Минздрава и строго регламентируется с точки зрения охраны здоровья потенциального потребителя. Для каждого вида пищевого продукта определены материалы, допущенные или запрещенные к контакту с ним, и соответственно, к применению в процессе производства. С этой целью разработан руководящий технический материал РТМ 27-72-15-82 «Машины и оборудование продовольственные. Порядок применения металлов, синтетических и других материалов, контактирующих с пищевыми

продуктами и средами», который устанавливает правила применения металлов, синтетических и других материалов, контактирующих с пищевыми продуктами и средами в изделиях продовольственного машиностроения [13].

В процессе эксплуатации машин и аппаратов пищевой и перерабатывающей промышленности происходит потеря их работоспособности главным образом из-за износов, приводящих к разрушению отдельных деталей. Наиболее встречающимися видами износа являются: механический, усталостный, молекулярно-механический и коррозионный, а также их комбинации. Ввиду того, что основная доля деталей такого оборудования изготавливается из коррозионностойких сталей, то к материалам и методам устранения износов предъявляются соответствующие требования [14].

Исследуя техническое состояние роботизированной доильной установки *Lely Astronaut*, можно выделить ресурсопределяющие элементы конструкции – направляющие, по которым в течение всего рабочего цикла перемещается «Рычаг доильного аппарата» (рис. 1). Износы направляющих на такого вида аппаратах возникают по причине воздействия длительных истирающих нагрузок, попадания на них химических реактивов и обеззараживающих средств при обработке установки, частиц комбикормов, а также отсутствия смазочных материалов на направляющих [15].

В результате износов, носящих комбинированный характер, появляются люфты, возникают вибрации и ухудшается координация исполнительных элементов доильной установки, а также устройства промывки и дезинфекции вымени коровы и как результат, ухудшается общее состояние коровы из-за неточных действий доильного аппарата.



a

b

Рис. 1. Роботизированная доильная установка *Lely Astronaut*: а – общий вид со стороны оператора; б – износ направляющих  
Fig. 1. *Lely Astronaut* robotic milking machine: а – view from the operator's side; б – wear of the guides

В пищевом производстве, в частности в кондитерской отрасли, даже на упаковочных машинах

готовой продукции присутствуют значительные износы основных элементов. Такие машины зачастую изготавливаются в соответствии с РТМ 27-72-15-82 и из аналогичных конструкционных материалов.

Упаковочное оборудование, работающее в непрерывном производственном процессе кондитерской фабрики и останавливаемое только для технологического обслуживания и ремонта поточной линии, представили на рисунках 2, 3.

На подобных машинах преобладают комбинированные износы из механических и усталостных износов.

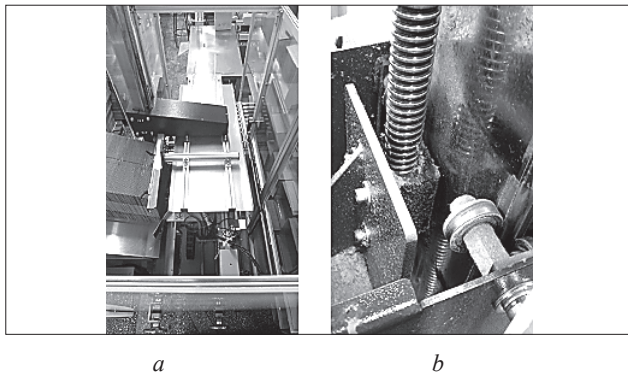


Рис. 2. Автоматическая машина для раскрывания картонной заготовки и склеивания клейкой лентой нижней части коробки: а – общий вид машины; б – место износа направляющей и ролика  
Fig. 2. Automatic machine for opening a cardboard blank and gluing the bottom of the box with adhesive tape: a – view of the machine; b – wear of the guide and roller

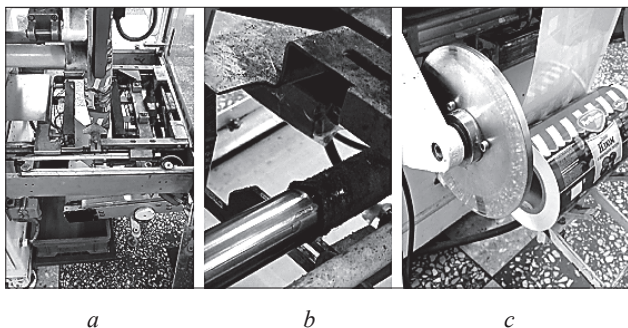


Рис. 3. Автоматическая упаковочная машина: а – исполнительные механизмы; б – износ направляющей; с – износ приводного диска  
Fig. 3. Automatic packaging machine: a – actuators; b – wear of the guide; c – wear of the drive disc

Помимо направляющих на автоматической упаковочной машине подвергается износу приводной диск, отвечающий за подачу упаковочной ленты (рис. 3, с).

В результате износов на оборудовании наблюдаются толчки и вибрации при перемещении ис-

полнительных механизмов, а также заедание упаковочного материала, что приводит к остановке упаковочного процесса.

Существующие способы восстановления таких деталей не всегда удовлетворяют современным требованиям, в частности, многие из них не обеспечивают требуемую износостойкость рабочих поверхностей деталей, имеют высокую себестоимость, восстановленные детали не соответствуют санитарным нормам [16].

В настоящее время разработано широкое многообразие способов восстановления сварочно-наплавочными методами. Учитывая, что при наплавке деталей из коррозионностойких сталей не допускается перегрев металла, приводящий к межкристаллитной коррозии и охрупчиванию зоны термического влияния, определили, что наиболее целесообразным является применение лазера или плазменно-порошковой наплавки. Использование порошковых материалов обусловлено широкими возможностями по регулированию легирования и геометрии наплавленного металла.

**Выводы.** Проанализировав специфику и условия работы оборудования перерабатывающего и пищевого производства можно сделать вывод, что наиболее применяемыми материалами для деталей такого оборудования служат коррозионностойкие стали. Помимо требований по прочности, жесткости, термо- и коррозионной стойкости, к данным материалам предъявляются также требования Минздрава в области охраны здоровья. Поэтому вопрос выбора способа восстановления таких деталей имеет большое значение. К тому же легированные стали плохо поддаются свариванию. Наиболее целесообразным является применение лазера или плазменно-порошковой наплавки. В качестве наплавочного материала предпочтительно применять порошок, полученный методом электроэрозионного диспергирования из выбраковываемых деталей, так как элементный состав наносимых покрытий будет идентичен материалу восстанавливаемых поверхностей.

### Библиографический список

1. Сыроватка В.И., Жданова Н.В., Дорохов А.С. и др. Автоматические установки для производства комбикормов в хозяйствах // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. №2. С. 66-71. DOI 10.30850/vrsn/2020/2/66-71.
2. Зуевский В.А., Задорожний Р.Н., Романов И.В. Использование порошковых материалов в технологиях восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной



техники // *Технический сервис машин*. 2021. Т. 59. N4(145). С. 180-190. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-180-190.

3. Ловчикова Е.И., Зверева Г.П., Волченкова А.С. и др. Тенденции и тренды рынка пищевой и перерабатывающей промышленности в России // *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2022. N6(88). С. 106-113. DOI 10.33938/226-106.

4. Дорофеева В.Н., Щербаков А.И., Коростелева И.Г. и др. Питтинговая коррозия нержавеющей стали 40X13 в слабоминерализованной воде // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. N4. С. 17-20. DOI 10.31044/1813-7016-2020-0-4-17-20.

5. Каплан М.А., Иванников А.Ю., Конушкин С.В. и др. Исследование структуры, механических и антибактериальных свойств коррозионностойкой стали, легированной серебром и титаном // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2022. Т. 502. N1. С. 41-49. DOI: 10.31857/S268695352201006X.

6. Мокрицкий Б.Я., Саблин П.А., Космынин А.В. и др. Совершенствование обработки коррозионностойких нержавеющей сталей // *Транспортное машиностроение*. 2023. N7(19). С. 26-39. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-26-39.

7. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г. и др. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // *Труды ВИАМ*. 2021. N10(104). С. 3-11. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.

8. Максаров В.В., Нгуен В.Д., Ефимов А.Е. и др. Технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей заготовки из сталей аустенитного класса // *Металлообработка*. 2023. N1(133). С. 47-54. DOI: 10.25960/мо.2023.1.47.

9. Ефимов М.В., Кидалов Н.А., Габельченко Н.И. и др. Исследование взаимного влияния технологии сварки и термической обработки сварных соединений из разнородных марок сталей // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. N7(254). С. 83-87. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-7-254-83-87.

10. Сурикова Н.С., Власов И.В., Наркевич Н.А. и др. Структура и деформационные свойства аустенитной нержавеющей стали // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. N3. С. 314-321. DOI: 10.31857/S0015323020010179.

11. Долгачев Ю.В., Пустовойт В.Н., Егоров М.С. и др. Влияние магнитного состояния аустенита на термодинамику и кинетику мартенситного превращения в стали // *Металлург*. 2022. N10. С. 63-69. DOI: 10.52351/00260827\_2022\_10\_63.

12. Ухарцева И.Ю., Цветкова Е.А., Гольдаде В.А. и др. Технологические аспекты производства тары и упаковки для пищевых продуктов // *Полимерные матери-*

*лы и технологии*. 2022. Т. 8. N4. С. 6-31. DOI: 10.32864/polytmatttech-2022-8-4-6-31.

13. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Иванов В.В. и др. Энергосберегающий модуль для охлаждения молока с использованием природного холода и низкотемпературных хладоносителей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67. N3(40). С. 3-8. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-3-3-8.

14. Кулумбегов М.М. Экономический анализ эффективности деятельности российских производителей оборудования для молочной промышленности // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика*. 2023. Т. 31. N1. С. 49-58. DOI: 10.22363/2313-2329-2023-31-1-49-58.

15. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Кирсанов В.В. и др. Концепция построения регионального многофункционального сервисного центра по молочному животноводству // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 4-10. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-4-10.

16. Кравченко И.Н., Карцев С.В., Сидоров М.И. и др. Обоснование рациональных режимов нанесения плазменных покрытий на детали декантерных центрифуг перерабатывающих производств АПК // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2019. N11. С. 43-48. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-43-48.

## References

1. Syrovatka V.I., Zhdanova N.V., Dorohov A.S., Obuhov A.D. Automatic installations for the production of animal feed on farms. *Vestnik of the russian agricultural science*. 2020. N2. 66-71 (In Russian). DOI 10.30850/vrsn/2020/2/66-71.

2. Zuyevskiy V.A., Zadorozhniy R.N., Romanov I.V. The use of powder materials in the technologies of restoration and hardening of agricultural machinery parts. *Machinery technical service*. 2021. Vol. 59. N4(145). 180-190 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-180-190.

3. Lovchikova E.I., Zvereva G.P., Volchenkova A.S., et al. Trends in the market of the food and processing industry in Russia. *Economics, labor, management in agriculture*. 2022. N6(88). 106-113 (In Russian). DOI 10.33938/226-106.

4. Dorofeeva V.N., Shcherbakov A.I., Korosteleva I.G., et al. Pitting corrosion of aisi 420 (40x13) stainless steel in low-mineralized water. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2020. N4. 17-20 (In Russian). DOI 10.31044/1813-7016-2020-0-4-17-20.

5. Kaplan M.A., Ivannikov A.Y., Konushkin S.V., et al. Study of the structure, mechanical and antibacterial properties of corrosion: resistant steel alloyed with silver and titanium. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Himiya, nauki o materialah*. 2022. Vol. 502. N1. 41-49 (In Russian). DOI: 10.31857/S268695352201006X.



6. Mokritsky B.Ya., Sablin P.A., Kosmynin A.V., et al. *Improvement of machining corrosion-resistant stainless steels. Transport Engineering. 2023. N7(19). 26-39 (In Russian). DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-26-39.*

7. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., et al. *Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. Proceedings of VIAM. 2021. N10(104). 3-11 (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.*

8. Maksarov V.V., Nguyen V.D., Efimov A.E., et al. *Technological assurance of the quality of operational surfaces of a workpiece made of austenitic steels. Metalworking. 2023. N1(133). 47-54 (In Russian). DOI: 10.25960/mo.2023.1.47.*

9. Efimov M.V., Kidalov N.A., Gabelchenko N.I., et al. *Investigation of the mutual influence of welding technology and heat treatment of welded joints made of dissimilar grades of steel. Izvestia Volgograd state technical university. 2021. N7(254). 83-87 (In Russian). DOI: 10.35211/1990-5297-2021-7-254-83-87.*

10. Surikova N.S., Vlasov I.V., Narkevich N.A., et al. *Structure and deformation properties of austenitic stainless steel. Fizika metallov i metallovedenie. 2020. Vol. 121. N3. 314-321 (In Russian). DOI: 10.31857/S0015-323020010179.*

11. Dolgachev Yu.V., Pustovojt V.N., Egorov M.S., et al. *Effect of magnetic state of austenite on thermodynamics and kinetics of martensitic transformation in steel. Metallurg. 2022. N10. 63-69 (In Russian). DOI: 10.52351/00260827\_2022\_10\_63.*

12. Ukhartseva I.Yu., Tsvetkova E.A., Goldade V.A., et al. *Technological aspects of manufacturing containers and packaging for food products. Polymer materials and technologies. 2022. Vol. 8. N4. 6-31(In Russian). DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-4-6-31.*

13. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Ivanov V.V., et al. *Energy saving milk cooling unit using natural cold and low temperature coolants. Electrical engineering and electrical equipment in agriculture. 2020. Vol. 67. N3(40). 3-8 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-3-3-8.*

14. Kulumbegov M.M. *Economic analysis of the performance of Russian manufacturers of equipment for the dairy industry. RUDN journal of economics. 2023. Vol. 31. N1. 49-58 (In Russian). DOI: 10.22363/2313-2329-2023-31-1-49-58.*

15. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., et al. *Conceptual grounds for the construction of a regional multifunctional service center for dairy livestock. Agricultural Engineering. 2021. N1(101). 4-10 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-4-10.*

16. Kravchenko I.N., Karcev S.V., Sidorov M.I., et al. *Justification of rational conditions for deposition of plasma*

*coatings on components of decanter centrifuges of processing enterprises of agricultural sector. Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya. 2019. N11. 43-48 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-43-48.*

#### **Заявленный вклад соавторов**

Задорожный Р.Н. – научное руководство, правка текста;

Кудряшова Е.Ю. – доработка текста, анализ литературных данных;

Романов И.В. – анализ литературных данных, подготовка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

Zadorozhny R.N. – scientific guidance, editing the manuscript;

Kudryashova E.Yu. – revision of the text, analysis of literature data;

Romanov I.V. – analysis of literature data, preparation of the manuscript.

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 05.12.2023**

**Статья принята к публикации 01.02.2024**

## ПЛАСТИЧЕСКАЯ ТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА



<sup>1</sup>Сергей Юрьевич Жачкин, доктор технических наук, профессор, e-mail: zhach@list.ru;

<sup>2</sup>Григорий Игоревич Трифонов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

<sup>2</sup>Олег Анатольевич Сидоркин, кандидат технических наук, доцент;

<sup>1</sup>Алексей Владимирович Пустоветов, соискатель

<sup>1</sup>Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I,  
г. Воронеж, Российская Федерация

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация

**Реферат.** Одной из распространенных проблем, приводящих к выходу агрегатов сельскохозяйственной техники из строя, служит значительное изменение их геометрических характеристик, что связано с износом отдельных элементов силовой гидравлической аппаратуры. Для восстановления данных деталей целесообразно использовать методы нанесения дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия, сопровождающиеся внедрением инструментального материала в наносимое покрытие за счет прямого контакта инструмента с обрабатываемой деталью. В результате получают износостойкие осадки с заданными физико-механическими свойствами в зависимости от величины износа различных участков восстанавливаемой поверхности. (Цель исследования) Определить прочностные показатели дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий, используемых для восстановления силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники. (Материалы и методы) Использовали в качестве экспериментальных образцов гидроцилиндры привода рабочих органов сельскохозяйственной техники. Отметили, что согласованное изменение давления инструмента в зависимости от степени износа поверхности позволяет получать размерные покрытия с заданными свойствами. (Результаты и обсуждение) Привели сопоставление результатов, полученных при решении контактной задачи соприкосновения двух тел, решаемой методами механики сплошной среды, и экспериментальных исследований и определили для данного типа композиционного материала зависимость между величиной усилия вдавливания частиц в покрытие и глубиной их внедрения. Проведенные исследования позволили ввести понятие пластической твердости, качественно и количественно характеризующее свойства получаемых гальванических осадков. (Выводы) Полученные в работе соотношения позволяют контролировать процесс формирования композиционного гальванического осадка при восстановлении силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники, не допуская переупрочнения такого покрытия и задавая ему требуемую степень наклепа.

**Ключевые слова:** упругое состояние, пластичность, упрочнение, композиционные покрытия, пластическая твердость.

**Для цитирования:** Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Сидоркин О.А., Пустоветов А.В. Пластическая твердость композиционных покрытий на основе хрома // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 94-100. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-94-100. EDN: SKKMBV.

Research article

## PLASTIC HARDNESS OF COMPOSITE COATINGS BASED ON CHROME

<sup>1</sup>Sergey Yu. Zhachkin, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>2</sup>Grigoriy I. Trifonov, Ph.D.(Eng.), senior researcher;

<sup>1</sup>Voronezh State Agricultural University named after emperor Peter I, Voronezh, Russian Federation  
<sup>2</sup>Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russian Federation

**Abstract.** One of the common problems leading to the failure of agricultural machinery units is a significant change in their geometric characteristics, which is associated with the wear of individual elements of power hydraulic equipment. To restore these parts, it is advisable to use methods of applying a dispersed-hardened galvanic composite coating, accompanied by the introduction of tool material into the coating due to direct contact of the tool with the workpiece. As a result, wear-resistant sediments with specified physical and mechanical properties are obtained, depending on the amount of wear of various sections of the surface being restored. (Research purpose) The research purpose is determining the strength parameters of dispersed-hardened galvanic composite coatings used for the restoration of power hydraulic equipment of agricultural machinery. (Materials and methods) Hydraulic cylinders of the drive of working bodies of agricultural machinery were used as experimental samples. It was noted that the coordinated change in tool pressure depending on the degree of wear of the surface makes it possible to obtain dimensional coatings with specified properties. (Results and discussion) A comparison of the results obtained in solving the contact problem of the contact of two bodies, solved by the methods of continuum mechanics, and experimental studies, and determined for this type of composite material the relationship between the magnitude of the force of pressing particles into the coating and the depth of their penetration. The conducted research allowed us to introduce the concept of plastic hardness, which qualitatively and quantitatively characterizes the properties of the resulting galvanic precipitation. (Conclusions) The relations obtained in the work allow us to control the process of forming a composite galvanic deposit during the restoration of power hydraulic equipment of agricultural machinery, preventing overhardening of such a coating, and setting it the required degree of hardening.

**Keywords:** elastic state, plasticity, hardening, composite coatings, plastic hardness.

**For citation:** Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Sidorkin O.A., Pustovetov A.V. Plastic hardness of composite coatings based on chrome. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 94-100 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-94-100. EDN: SKKMBV.

Повышение требований к качеству выпускаемой агропромышленной техники заставляет постоянно искать пути совершенствования существующих методов восстановления вышедшей из строя специальной техники [1].

Приходится постоянно решать оптимизационную задачу, связанную, с одной стороны, с продлением ресурса используемых узлов и агрегатов, а с другой – с минимизацией трудозатрат на восстановление [2].

Одной из распространенных проблем, приводящих к выходу агрегатов из строя, служит значительное изменение их геометрических характеристик, что связано с износом отдельных элементов [3].

Практика показывает, что подавляющее большинство деталей, поступающих на предприятия для восстановления, имеет дефекты поверхности [4].

Данное обстоятельство приходится учитывать при разработке способов размерного восстанов-

ления вышедших из эксплуатации деталей [5].

Использование методов нанесения дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия сопровождается внедрением инструментального материала в наносимое покрытие за счет прямого контакта инструмента с обрабатываемой деталью [6].

Это позволяет получать гальванические композиционные покрытия с различной степенью деформации в зависимости от величины износа различных участков восстанавливаемой поверхности [7].

Схему восстановления изношенной поверхности показали на рисунке 1.

Возникновение упругих или упруго-пластических деформаций в связи с наличием дефектов на обрабатываемой поверхности в различных областях приводит к неравномерному распределению фрикционных показателей изучаемой детали по всей обрабатываемой поверхности и обусловлено

фактической площадью касания, размером контактных пятен, сближением поверхностей и другими показателями, определяющими микрогеометрию контактирующих поверхностей и их физико-механические свойства.

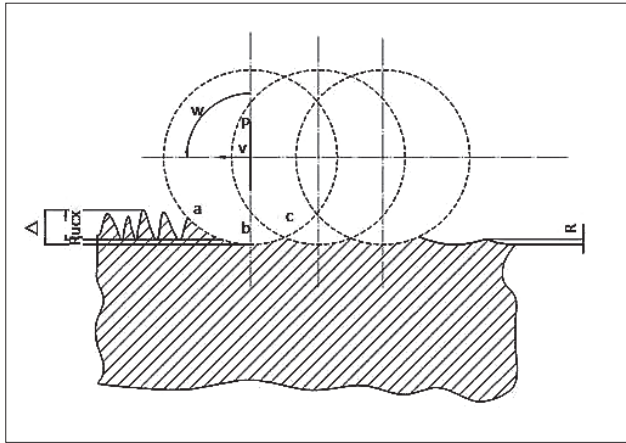


Рис. 1. Схема нанесения износостойкого композиционного покрытия:  $R_{исх}$  – начальная шероховатость осаждаемого покрытия;  $R$  – конечная шероховатость осаждаемого покрытия;  $w$  – угловая скорость ролика, обрабатывающего поверхность детали;  $P$  – сила, действующая на ролик нормально к обрабатываемой поверхности;  $v$  – скорость перемещения ролика относительно обрабатываемой поверхности;  $a$  – точка начала контакта ролика с обрабатываемой поверхностью;  $b$  – середина контакта ролика с деталью;  $c$  – точка окончания контакта ролика с обрабатываемой поверхностью;  $\Delta$  – общая глубина воздействия на осаждаемое покрытие

Fig. 1. Scheme of application of wear-resistant composite coating:  $R_{ish}$  is the initial roughness of the deposited coating;  $R$  – final roughness of the deposited coating;  $w$  – angular speed of the roller processing the surface of the part;  $P$  – force acting on the roller normal to the surface being processed;  $v$  – speed of roller movement relative to the surface being processed;  $a$  – the point where the roller contacts the surface being processed;  $b$  – the middle of the contact of the roller with the part;  $c$  – end point of contact of the roller with the surface being processed;  $\Delta$  – total depth of impact on the deposited coating

**Цель исследования** – определить прочностные показатели дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий, используемых для восстановления силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

**Материалы и методы.** Технология нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий подразумевает использование одновременно нескольких обкатывающих инструментальных роликов [8]. В связи с наличием дефектов на обрабатываемой поверхности в различных областях могут возникать как упругие, так и упруго-пластические деформации [9].

Согласованное изменение давления инструмента в зависимости от степени износа поверхности позволит получать размерные покрытия с заданными свойствами [10].

**Результаты и обсуждение.** Для определения прочностных показателей осаждаемого покрытия рассмотрим процесс внедрения сферических инденторов в формируемый гальванический слой. Положим диаметры рассматриваемых частиц:  $D_1$  и  $D_2 = \chi D_1$ . Действие рассматриваемых частиц осуществляется с нагрузками  $P_1$  и  $P_2$  соответственно. Рассматривая классическую контактную задачу теории упругости для контактирующих тел с учетом введенных переменных справедливо соотношение [11]:

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \frac{P_2}{\chi^2 D_1^2}. \quad (1)$$

Теперь нетрудно получить зависимость между значениями усилий, создаваемых различными инденторами:

$$P_2 = \chi^2 P_1.$$

Тогда средние давления на поверхности контакта будут:

$$P_{cp}^1 = \frac{P_1}{F_1}, \quad P_{cp}^2 = \frac{P_2}{F_2},$$

где  $F_1, F_2$  – площади контакта под нагрузкой рассматриваемых частиц.

Принимая во внимание допущения, представленные на рисунке 2, определим площадь фактического контакта:

$$F_1 = 2\pi R_{H,1} (h_1 + 0,5W_2'), \quad F_2 = 2\pi R_{H,2} (h_2 + 0,5W_2').$$

Поскольку

$$R_H \approx R \frac{h + W_2}{h + 0,5W_2},$$

то окончательно для площадей контакта получим:

$$F_1 = 2\pi R_1 (h_1 + W_2') = \pi D_1 t_1; \quad F_2 = 2\pi R_2 (h_2 + W_2') = \pi D_2 t_2.$$

В случае, когда углы вдавливания совпадают, имеет геометрическое подобие средних давлений  $p_{срi}$  [12].

В этом случае соотношение (1) примет вид:

$$\frac{P_1}{\pi D_1 t_1} = \frac{P_2}{\pi D_2 t_2} = \frac{\chi P_1}{\pi D_1 t_2}. \quad (2)$$

Согласно теории Галуа для  $D_1 = 2R_1$  и  $D_2 = 2R_2$  решение контактной задачи дает [13]:



$$W' = 1,405 \sqrt[3]{\frac{k^2 P_1^2}{R_1 \left(1 + \frac{h_1}{W'}\right)}} \quad \text{и} \quad W'' = 1,405 \sqrt[3]{\frac{k^2 P_2^2}{R_2 \left(1 + \frac{h_2}{W''}\right)}} \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от упругих свойств материала контактирующих тел.

Полагая  $h_1 + W' = t_1$  и  $h_2 + W'' = t_2$  и учитывая соотношения (2) и (3), находим соотношения между упруго-пластическими деформациями для обеих частиц:

$$\frac{W''}{W'} = \sqrt[3]{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 \frac{R_1 t_1 W''}{R_2 t_2 W'}} = \chi \sqrt[3]{\frac{W''}{\chi W'}}, \quad W'' = \chi W' \quad \text{и} \quad h_2 = \chi h_1, \quad (4)$$

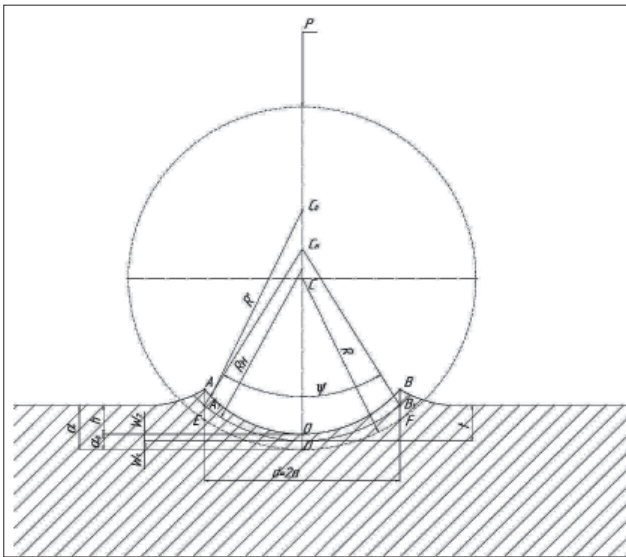


Рис. 2. Схема контакта частицы композиционного материала с покрытием:  $R, R_H, R'$  – радиус инструмента и радиусы кривизны поверхности вмятины под нагрузкой и после разгрузки;  $h$  – глубина восстановления материала после снятия нагрузки;  $W_1, W_2$  – упругая деформация инструмента под нагрузкой и упругое восстановление покрытия после снятия нагрузки;  $t$  – полная глубина деформации под нагрузкой;  $\alpha_\gamma, \alpha$  – обратимое упругое и полное сближение контактируемых тел;  $d, a$  – диаметр и радиус контура остаточной вмятины;  $P$  – контактная нагрузка;  $\psi$  – угол вдавливания;  $C, C_H, C_B$  – центры кривизны недеформируемой исходной поверхности инструмента, поверхности вмятины под нагрузкой и поверхности восстановленной вмятины

Fig. 2. The contact diagram of a particle of a composite material with a coating:  $R, R_H, R'$  – radius of the tool and the radii of curvature of the surface of the dent under load and after unloading;  $h$  – depth of recovery of the material after removal of the load;  $W_1, W_2$  – elastic deformation of the tool under load and elastic recovery of the coating after removal of the load;  $t$  – full depth of deformation under load;  $\alpha, \alpha_\gamma$  – reversible elastic and complete convergence of the contacting bodies;  $d, a$  – diameter and radius of the contour of the residual dent;  $P$  – contact load;  $\psi$  – angle of indentation;  $C, C_H, C_B$  – centers of curvature of the undeformable initial surface of the tool, the surface of the dent under load and the surface of the restored dent

Результаты проведенных экспериментов позволяют утверждать, что соотношения (4) справедливы также и в том случае, когда упругие свойства контактирующих тел различны [14].

Если  $P'_1 = \lambda D_1^2$  и  $P'_2 = \lambda D_2^2$  – произвольные нагрузки, отвечающие глубинам отпечатков  $h1'$  и  $h2'$  соответственно, то в соответствии с (1) и (2) будем иметь:

$$\frac{P_2 - P'_2}{D_2 (h_2 - h'_2)} = \frac{\chi^2 P_1 - \chi^2 P'_1}{\chi D_1 (\chi h_1 - \chi h'_1)} = \frac{P_1 - P'_1}{D_1 (h_1 - h'_1)}. \quad (5)$$

Соотношение (5) справедливо для геометрически подобных отпечатков. Однако можно показать его истинность и в общем случае для любой пары отпечатков. Из диаграммы  $P(h)$ , представленной на рисунке 3, находим при  $D_1 = D_2$  и произвольных нагрузках  $P$  и  $P'$  [15]:

$$\frac{P - P'}{h - h'} = \frac{P_1 - P'_1}{h_1 - h'_1} = \text{tg} \gamma. \quad (6)$$

Обобщая полученные соотношения, можно записать:

$$\frac{P - P'}{D(h - h')} = \text{const}. \quad (7)$$

Из соотношения (7) видно, что при заданной разности нагрузок различие глубин вдавливания пропорционально диаметру внедряемых частиц.

Критическая нагрузка  $P^0$ , при которой возникает упрочнение формируемого покрытия, численно равна отрезку, отсекаемому прямой  $P(h)$  на оси  $P$  (рис. 3).

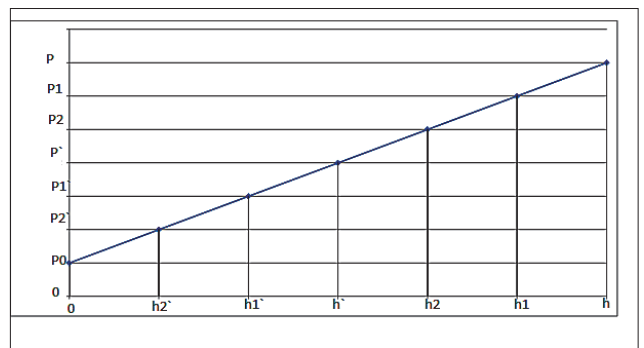


Рис. 3. Диаграмма зависимости внедрения инструментальных частиц в покрытие

Fig. 3. Dependence of the introduction of tool particles into the coating

Выявленная закономерность дает основание ввести в рассмотрение параметр, который по своему физическому смыслу представляет не условное давление в контакте, а модуль упрочнения ма-

териала при внедрении в тело сферического индентора – контактный модуль упрочнения.

Таким параметром служит отношение:

$$\frac{P-P_0}{Dh} = \frac{1}{D} \text{tg} \gamma, \quad (8)$$

которое характеризует крутизну наклона прямой  $P(h)$  к оси  $h$  и в широком интервале глубин внедрения (как показали многочисленные исследования до  $h < 0,07D$ ) не зависит от диаметра штампа и контактной нагрузки.

Для удобства сравнения с твердостью по Бриггеллю,  $HV$  можно считать числом пластической твердости:

$$HD = \frac{P-P_0}{\pi Dh}, \quad (9)$$

которое определяется по глубине остаточного отпечатка  $h$ , измеренного на поверхности испытуемого объекта после снятия рабочей нагрузки.

Переход от твердости как понятия, тождественного условному контактному напряжению, к твердости  $HD$ , определяемой соотношением (9) и интерпретируемой как модуль упрочнения материала, позволяет рассматривать эту величину как характеристику сопротивления материала контактной пластической деформации.

Значения  $HV$  и  $HD$  для композиционных электролитических покрытий на основе хрома и железа приведены в таблице. Видно, что число пластической твердости практически нечувствительно к степени нагружения.

Значения $HV$		
$P/D^2$ , МПа	КЭП на основе железа	КЭП на основе хрома
49	970/1195	1105/1635
98	1035/1245	1260/1635
196	1080/1245	1490/1730

В то же время с возрастанием  $P/D$  наблюдается закономерное увеличение твердости  $HV$ .

**Выводы.** Анализ представленных данных наглядно демонстрирует, что в основе независимости пластической твердости от нагрузки и диаметра индентора лежит линейная зависимость  $P(h)$ , что подтверждается многочисленными опытами авторов и других исследователей.

Знаменатель  $\pi Dh$  в соотношении для определе-

ния пластической твердости по виду сходен с величиной  $\pi Dt$ , представляющей собой площадь поверхности не восстановленного отпечатка с глубиной  $t$ , встречающейся при решении классической контактной задачи Герца.

Однако произведение  $\pi Dh$  не является площадью поверхности восстановленного отпечатка, так как процесс упругого восстановления сопровождается не только уменьшением глубины отпечатка, но и увеличением радиуса кривизны его поверхности.

Полученные соотношения позволяют контролировать процесс формирования композиционного гальванического осадка, не допуская его переупрочнения с одной стороны, и задавая ему требуемую степень наклепа – с другой.

### Библиографический список

1. Денисов В.А., Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А. и др. Оценка триботехнических свойств и возможности применения композита ULTRAN 630CF для узлов трения сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2023. №6(312). С. 31-34. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-6-31-34.
2. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Киба М.Р. и др. Исследование теплопроводности полимерных нанокомпозитов // Наука в центральной России. 2022. №1(55). С. 81-91. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-81-91.
3. Денисов В.А., Ионов П.А., Пьянзов С.В. и др. Подходы к поиску конструктивных параметров ответственных деталей объемных гидроприводов зарубежного производства // Технический сервис машин. 2023. Т. 61. №3(152). С. 32-38. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-3-32-38.
4. Завражнов А.И., Ли Р.И., Псарев Д.Н. и др. Перспективный эластомерный нанокомпозит для восстановления корпусных деталей // Сельский механизатор. 2021. №8. С. 30-32. DOI: 10.47336/0131-7393-2021-8-30-31-32.
5. Астахов М.В., Славкина Е.В. Повышение стойкости к ударным воздействиям композитных узлов сельхозмашин применением уруговязкопластичных жидкостей // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30. №2. С. 268-286. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.268-286.
6. Астахов М.В., Славкина Е.В., Сорокина И.И. К повышению надежности сельскохозяйственных прицепов // Наука в центральной России. 2023. №1(61). С. 66-76. DOI: 10.35887/2305-2538-2023-1-66-76.
7. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н. и др. Исследование радиусов закругления режущих кромок упрочненных плоских ножей после производственных испы-

таний // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N2(151). С. 113-123. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-2-113-123.

8. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Сидоркин О.А. и др. Управление внутренними напряжениями в гальванических композитных покрытиях на основе железа // *Труды ГОСНИТИ*. 2017. Т. 129. С. 183-188. EDN: XENOZY.

9. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Свойства износостойких композиционных покрытий, полученных скоростным борированием // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. N2. С. 47-56. DOI: 10.31857/S0235711922020080.

10. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. The technical definition of permanent dispersion-strengthened composite multilayer galvanic coatings. *Australian journal of education and science*. 2018. Vol. XI. N1(21). 238-253.

11. Лялякин В.П., Слинко Д.Б., Денисов В.А. и др. Использование электромеханической обработки для повышения прочности сцепления напыленных покрытий // *Технология металлов*. 2022. N3. С. 16-19. DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-3-16-19.

12. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. Determination of the elastic modulus of the composite dispersion-strengthened galvanic coatings. *Engineering studies*. 2018. Vol. 10. N3-2. 729-737.

13. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N1. С. 41-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>.

14. Кравченко И.Н., Величко С.А., Мартынов А.В. и др. Повышение межремонтного ресурса гидравлических распределителей с применением метода электроискровой обработки // *Технология металлов*. 2023. N3. С. 33-41. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-3-33-41.

15. Кравченко И.Н., Величко С.А., Мартынов А.В. Оценка работоспособности и долговечности восстановленных деталей и соединений // *Технология металлов*. 2023. N7. С. 42-48. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-7-42-48.

## References

1. Denisov V.A., Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., et al. Evaluation of tribotechnical properties and the possibility of using ULTRAN 630CF composite for friction units of agricultural machinery. *Machinery and equipment for rural area*. 2023. N6(312). 31-34 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-6-31-34.

2. Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R., et al. Thermal conductivity study of polymer nanocomposites. *Science in the central Russia*. 2022. N1(55). 81-91 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-81-91.

3. Denisov V.A., Ionov P.A., P'yanzov S.V., et al. Searching for design parameters of critical parts of foreign

volumetric hydraulic actuators. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N3(152). 32-38 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-3-32-38.

4. Zavrazhnov A.I., Li R.I., Psarev D.N., et al. A promising elastomeric nanocomposite for the restoration of body parts. *Sel'skiy mekhanizator*. 2021. N8. 30-32 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2021-8-30-31-32.

5. Astakhov M.V., Slavkina E.V. Improving the shock resistance of agricultural composite units using viscoelastic fluids. *Engineering technologies and systems*. 2020. Vol. 30. N2. 268-286 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.268-286.

6. Astakhov M.V., Slavkina E.V., Sorokina I.I. To increase the reliability of agricultural trailers. *Science in the central Russia*. 2023. N1(61). 66-76 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2023-1-66-76.

7. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Rozhkov Yu.N., et al. Investigation of cutting edge radius of hardened flat knives after production tests. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N2(151). 113-123 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-2-113-123.

8. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Sidorkin O.A., et al. Control of internal voltages in galvanic composite coatings based on iron. *Trudy GOSNITI*. 2017. Vol. 129. 183-188 (In Russian). EDN: XENOZY.

9. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., et al. Properties of wear-resistant composite coatings produced by high-speed boration. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2022. N2. 47-56 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711922020080.

10. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. The technical definition of permanent dispersion-strengthened composite multilayer galvanic coatings. *Australian journal of education and science*. 2018. Vol. XI. N1(21). 238-253.

11. Lyalyakin V.P., Slinko D.B., Denisov V.A., et al. Use of electromechanical processing to increase adhesion strength of sprayed coatings. *Tekhnologiya metallov*. 2022. N3. 16-19 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-3-16-19.

12. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. Determination of the elastic modulus of the composite dispersion-strengthened galvanic coatings. *Engineering studies*. 2018. Vol. 10. N3-2. 729-737.

13. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural machinery and technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>.

14. Kravchenko I.N., Velichko S.A., Martynov A.V., et al. Increase of overhaul life of hydraulic distributors, using method of electric-spark processing. *Tekhnologiya metallov*. 2023. N3. 33-41 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-

2499-2023-0-3-33-41.

15. Kravchenko I.N., Velichko S.A., Martynov A.V. Assessment of operability and durability of restored parts and connections. *Tekhnologiya metallov*. 2023. N7. 42-48 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-7-42-48.

#### **Заявленный вклад соавторов**

Жачкин С.Ю. – научное руководство,  
подготовка текста;

Трифонов Г.И. – подготовка текста,  
анализ литературных данных;

Сидоркин О.А. – анализ литературных  
данных, доработка и редактирование текста;

Пустоветов А.В. – доработка и  
редактирование  
текста.

Все авторы прочитали и одобрили  
окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

Zhachkin S.Yu. – scientific guidance, text preparation;  
Trifonov G.I. – text preparation, analysis  
of literary data;

Sidorkin O.A. – analysis of literature data,  
revision and editing text;

Pustovetov A.V. – revision and editing of the text.

All authors read and approved the final version  
of the manuscript.

**Статья поступила в редакцию 08.12.2023**

**Статья принята к публикации 12.02.2024**



**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ  
КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ**

*Вячеслав Александрович Денисов, доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник, e-mail: va.denisov@mail.ru;  
Никита Александрович Попов, аспирант, инженер*

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация*

**Реферат.** Представили результаты исследования прирабатываемости и износостойкости комбинированного покрытия восстановленных гильз цилиндров, полученного нанесением на чугунную основу слоя порошка алюминия методом холодного газодинамического напыления с последующей обработкой микродуговым оксидированием. (Цель исследования) Провести сравнительный анализ триботехнических свойств сопряжений «гильза с покрытием методом холодного газодинамического напыления и обработкой микродуговым оксидированием–контробразец 100Cr6» и «гильза (СЧ25 в состоянии поставки)–контробразец 100Cr6» (эталонное сопряжение). (Материалы и методы) Провели исследование прирабатываемости материалов эталонного и восстановленного сопряжений по РД 50-662-88 «Методические указания. Методы экспериментальной оценки фрикционной совместимости материалов трущихся сопряжений». Выполнили сравнительные стендовые испытания на износостойкость эталонного и восстановленного сопряжений по ГОСТ 23.224-86 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей». (Результаты и обсуждение) Определили оптимальные режимы длительной работы и пределы работоспособности сопряжения при ступенчатом нагружении эталонного и восстановленного трибосопряжений. Вычислили коэффициент прирабатываемости и фактор изнашивания сопряжений. Установили, что восстановленное сопряжение «гильза с покрытием методом холодного газодинамического напыления и обработкой микродуговым оксидированием–контробразец 100Cr6» имеет близкие показатели прирабатываемости с эталонным сопряжением, а его износостойкость превосходит износостойкость эталонного сопряжения, более чем в два раза. (Выводы) Высокие показатели прирабатываемости и износостойкости восстановленного сопряжения «гильза с покрытием методом холодного газодинамического напыления и обработкой микродуговым оксидированием–контробразец 100Cr6» по сравнению с гильзой эталонной (из СЧ25 в состоянии поставки) обеспечивают повышение его долговечности и указывают на целесообразность применения комбинированного метода при восстановлении гильз цилиндров.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, микродуговое оксидирование, гильза цилиндра, восстановление, износостойкость.

**Для цитирования:** Денисов В.А., Попов Н.А. Исследование износостойкости гильз цилиндров, восстановленных керамическим покрытием // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. №1. С. 101-106. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-101-106 EDN: JZKXTE.

Research article

**THE WEAR RESISTANCE OF CYLINDER LINERS RESTORED BY CERAMIC COATING**

*Vyacheslav A. Denisov, Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher;  
Nikita A. Popov, postgraduate, engineer*

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The results of the study of the workability and wear resistance of the combined coating of the restored cylinder liners obtained by applying a layer of aluminum powder to the cast-iron base by cold gas-dynamic spraying with subsequent treatment by microarc oxidation were presented. (Research purpose) The research purpose is a comparative analysis of the tribotechnical properties of the conjugations "sleeve coated with cold gas-dynamic spraying and treatment with microarc oxidation-counter-sample 100Cr6" and "sleeve (SH25 in the delivery state)-counter-sample 100Cr6" (reference pairing). (Materials and methods) Conducted a study of the workability of materials of the reference and reconstructed conjugations according to RD 50-662-88 "Guidelines. Methods of experimental evaluation of frictional compatibility of materials of friction conjugations". Comparative bench tests were performed on the wear resistance of the reference and restored conjugates according to GOST 23.224-86 "Ensuring the wear resistance of products. Methods for assessing the wear resistance of restored parts". (Results and discussion) The optimal modes of long-term operation and the limits of the interface operability were determined during the stepwise loading of the reference and restored tribo-couplings. The run-in coefficient and the wear factor of the couplings were calculated. It was found that the restored coupling "sleeve coated with cold gas-dynamic spraying and microarc oxidation treatment-counter-sample 100Cr6" has similar run-in rates with the reference coupling, and its wear resistance exceeds the wear resistance of the reference coupling by more than two times. (Conclusions) High indicators of workability and wear resistance of the restored interface "sleeve coated with cold gas-dynamic spraying and microarc oxidation treatment-counter-sample 100Cr6" in comparison with the reference sleeve (from SCH25 in the state of delivery) provide an increase in its durability and indicate the expediency of using the combined method in the restoration of cylinder liners.

**Keywords:** cold spray, microarc oxidation, cylinder liner, restoration, wear resistance.

**For citation:** Denisov V.A., Popov N.A. The wear resistance of cylinder liners restored by ceramic coating. *Machinery technical service*. 2024. Vol. 62. N1. 101-106 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-101-106. EDN: JZKXTE.

Гильза блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания работает в тяжелых условиях. Зеркало гильзы изнашивается в результате трения поршневых колец и действия абразивных частиц, содержащихся в смазке и засасываемом воздухе. Попадание в цилиндр всего одного процента неочищенного воздуха увеличивает износ поршневых колец и гильз в два раза. Во время работы двигателя на гильзы цилиндров одновременно оказывают действие различные факторы – температурные, силовые, химические. Режим работы двигателя, качество топливосмазочных материалов, рабочая температура, запыленность воздуха – основные причины быстрого износа зеркала гильзы цилиндра [1].

Этим обусловлена актуальность необходимости восстановления и упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндров.

Основным способом восстановления изношенных гильз цилиндров служит расточка под ремонтный размер, что влечет за собой снижение твердости внутренней поверхности и необходимость организации производства поршней и поршневых колец ремонтного размера. Способы восстановления гильз цилиндров в номинальный размер не нашли широкого применения из-за того, что не со-

ответствуют требованиям стандарта по качеству и имеют высокую себестоимость. Среди методов восстановления в номинальный размер свою область применения нашли электроконтактная приварка стальной ленты, индукционная центробежная наплавка, термопластическое деформирование, постановка дополнительной ремонтной детали, хромирование и железнение [2]. Однако эти процессы экономически целесообразны только при серийном и массовом ремонтном производстве. Среди методов профилактики с ремонтно-восстановительными свойствами можно отметить добавление наноструктурного бемита гидротермального синтеза в смазочные композиции для цилиндро-поршневой группы [3]. Одним из технологических подходов для повышения качества ремонта гильз цилиндров можно назвать метод плосковершинного хонингования с графитным насыщением [4].

Технология восстановления гильзы цилиндра с применением технологий ХГДН и МДО (нанесения комбинированного покрытия) обеспечивает высокую износостойкость рабочей поверхности гильзы цилиндра при восстановлении в номинальный размер. Применение данной технологии расширяет перспективы использования методов микродугового оксидирования по отношению к де-

талям цилиндрической группы [5]. В исследовании говорится о высокой износостойкости и антифрикционных свойствах данного покрытия, что важно в контексте использования его для ремонта гильз цилиндров [6]. Также комбинированное покрытие показало высокую стойкость по сравнению с конструкционными материалами при гидроабразивном износе [7].

Наносимое на внутренние цилиндрические поверхности покрытие имеет толщину от 0,2 до 0,5 мм после механической обработки; слой оксида алюминия на поверхности – от 80 до 120 мкм; шероховатость поверхности – не более  $Ra$  1,6 мкм; микротвердость поверхности покрытия – от 1500 до 2000  $HV$ . Адгезионная прочность покрытия на срез по проведенным ранее исследованиям составляет от 12 до 27 МПа [8].

**Цель исследования** – провести сравнительный анализ триботехнических свойств сопряжений «гильза с покрытием ХГДН и МДО–контробразец 100Cr6» и «гильза (СЧ25 в состоянии поставки)–контробразец 100Cr6» (эталонное сопряжение).

**Материалы и методы.** Износостойкость покрытия оценивали в соответствии с ГОСТ 23.224-86 по методу сравнительных экспресс-испытаний, который предусматривает определение соотношения интенсивностей изнашивания исследуемых поверхностей, испытываемых при заранее определенных идентичных условиях. Прирабатываемость сопряжения оценивали в соответствии с методическими указаниями РД 50-662-88.

Исследования проводили в центре коллективного пользования «Наноцентр» ФНАЦ ВИМ.

Для испытаний образцов материалов на износостойкость применяли трибометр *TRB-S-DE* фирмы *CSM Instruments*. Испытания на трибометре *TRB-S-DE* проводили по схеме «возвратно-поступательное движение» с исследуемым образцом в виде прямоугольного параллелепипеда, по которому перемещается (скользит) контробразец в виде шарика (рис. 1).

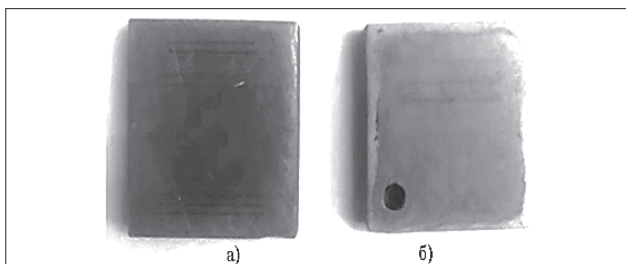


Рис. 1. Вид образцов для испытаний: а – без покрытия (эталон, СЧ25); б – с покрытием (ХГДН + МДО)

Fig. 1. Test samples: а – uncoated (standard, BS 250); б – coated (cold spray + MAO)

К индентору с шариком прикладывали нормируемую нагрузку.

Испытания выполняли со смазкой, т. е. в условиях граничного трения, аналогично условиям работы пары трения «гильза цилиндра–поршневое кольцо». В качестве смазки использовали масло *5W40*, изготовленное по стандарту ГОСТ 17479.1-2015 «Масла моторные. Классификация и обозначение». В процессе испытаний поддерживали постоянную влажность 45-50% и температуру окружающего воздуха 23-25 °С.

Образцу исследуемого материала, закрепленному в центре поверхности стола, придавали возвратно-поступательное движение с заданной частотой и средней скоростью 40 мм/с. В качестве контробразца использовали шарик диаметром 6 мм, изготовленный из стали *100Cr6*, который жестко закреплялся в торце цилиндрического штифта (индентора).

В процессе испытаний непрерывно измеряли коэффициент трения  $\mu$  и глубину внедрения шарика в исследуемый образец  $h$ .

Для проведения исследования были изготовлены два призматических образца с размерами 30x30x7 мм из чугуна СЧ25. На один из образцов было нанесено ХГДН-покрытие на основе порошка А-10-01 (содержит 15%  $Al_2O_3$ ) при помощи установки «Димет-403» на режиме «3-3» [9].

Пористость покрытия, согласно результатам исследования, составляла не более 2% [10].

Образец с покрытием из порошка алюминия был обработан МДО. Режимы МДО привели в таблице 1. Неравномерность толщины покрытия была вызвана неравномерностью распределения электромагнитного поля при микродуговом окислении.

Концентрация компонентов, г/л		Длительность МДО, мин	Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	КОН		
6-8	2		

На рабочих сторонах обоих образцов после механической обработки были получены поверхности с шероховатостью до  $Ra$  0,32 мкм, что соответствует требованиям к рабочим поверхностям гильз цилиндров в соответствии с ГОСТ Р 53809-2010 «Двигатели автомобильные. Гильзы цилиндров.

Технические требования и методы испытаний». Шероховатость определяли с помощью профило-

метра *Surtronic 25 ml 12/3522-01*.

**Результаты и обсуждение.** На первом этапе испытаний образцы прирабатывались при ступенчатом повышении нагрузки  $P$ . Длительность ступеней нагружения выбирали с учетом стабилизации коэффициента трения, составлявшей не менее 5 мин. В течение испытаний непрерывно фиксировали на диаграмме коэффициент трения  $\mu$  и глубину дорожки трения  $h$  (рис. 2, 3). Обработка диаграммы позволила построить зависимость изменения коэффициента трения  $\Delta\mu$  от нагрузки  $P$  (рис. 4).

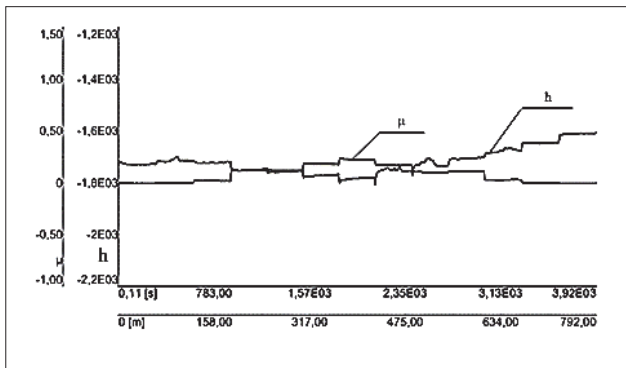


Рис. 2. Коэффициент трения в процессе испытания на прирабатываемость образца из чугуна

Fig. 2. Friction in the test for the running-in ability of a cast iron sample

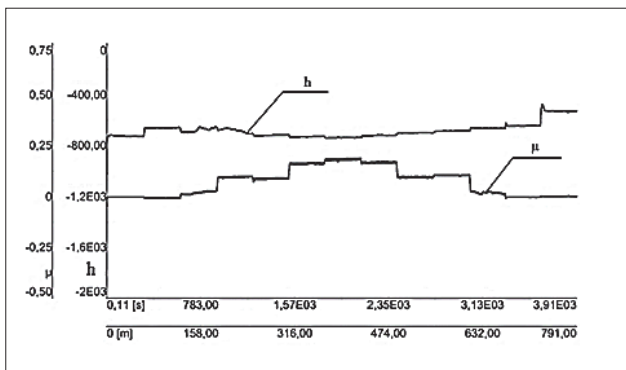


Рис. 3. Коэффициент трения в процессе испытания на прирабатываемость образца с комбинированным покрытием

Fig. 3. Friction in the testing the running-in ability of a sample with a combined coating

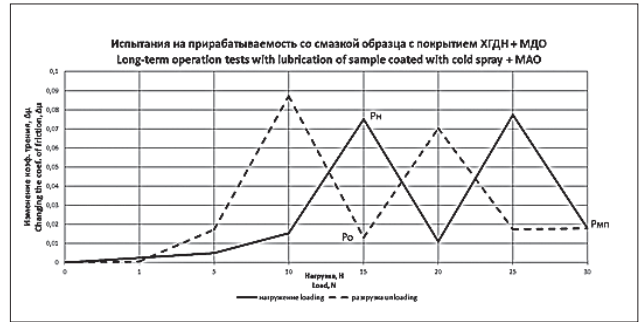
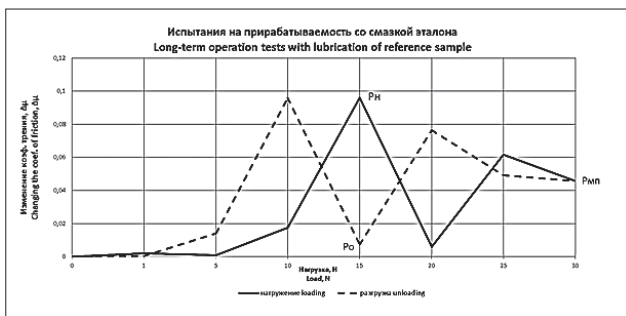


Рис. 4. Графики зависимости изменения коэффициента трения  $\Delta\mu$  от нагрузки  $P$

Fig. 4. Dependence of the change in the friction coefficient  $\Delta\mu$  on the load  $P$

По полученным графикам в соответствии с ГОСТ 23.224-86 определяли следующие параметры:

$P_{МП}$  – максимальное значение нагрузки для приработанной пары трения,  $H$ ;

$P_H$  – максимальное значение нагрузки для неприработанной пары трения,  $H$ ;

$P_O$  – оптимальное значение нагрузки при минимальном коэффициенте трения, выбранное для проведения испытаний на износ,  $H$ ;

$f_{min}$  – значение коэффициента трения, соответствующее  $P_O$ .

Значения нагрузок для каждого из образцов приведены в таблице 2.

Материал образца		Смазывание	Нагрузка (опт.)	Показатели работоспособности, $H$		
Материал контр-образца	$P_n$			$P_o$	$P_{мп}$	
Чугун СЧ25	100Cr6	Капельное, масло 5W40	15	15	30	
Комбинированное покрытие			15	15	30	

Испытания на износ проводили при нагрузке  $P_o$  до накопления износа, определяемого методом взвешивания, до прохождения индентором по образцу пути трения  $L = 1152$  м. В процессе испытания непрерывно фиксировали коэффициент трения  $\mu$  и глубину дорожки  $h$ .

Коэффициент прирабатываемости определяли по формуле:

$$\Pi = \frac{P_{MH} - P_H}{f_{min} P_O} \quad (1)$$

Интенсивность изнашивания исследуемых соединений вычисляли по формуле:

$$I = W/L, \quad (2)$$

где  $W$  – линейный износ образца, м;  $L$  – путь трения образца, соответствующий износу  $W$ , м.

$$L = N \cdot l,$$



где  $l$  – линейный размер поверхности трения сопряженного образца в направлении скольжения, м;  $N$  – число циклов, за каждый из которых поверхности трения образца проходят путь  $l$ .

Износ определяли взвешиванием по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{F_c}, \quad (3)$$

где  $\Delta G$  – изменение массы контробразца при испытании, кг;  $F_c$  – контурная площадь контакта образцов, м<sup>2</sup>.

Взвешивание образцов и контробразцов до и после испытания осуществляли на аналитических весах ВЛР-200 и заносили в протокол.

Интенсивность изнашивания пары в целом  $I_\Sigma$  определяли как сумму интенсивностей изнашивания элементов сопрягаемой пары трения. Сравнительную оценку интенсивности изнашивания сопряжений проводили по показателю фактора износа:

$$\Phi = \frac{I_\Sigma}{P_0}. \quad (4)$$

Результаты испытаний на износостойкость по элементам исследуемых сопряжений привели в таблице 3.

Таблица 3		Table 3				
Результаты испытаний на износостойкость						
Results of wear resistance tests						
Наименование образца	Износ образца, г	Износ индентора, г	$R_0, H$	Коэф. трения, $\mu_0$	Коэф. прираб., $\Pi$	Фактор износа суммарный $\Phi_\Sigma, H^{-1}$
Эталон чугуна №1	0,0002	$1,3 \cdot 10^{-6}$	15	0,018	55,56	$1,55 \cdot 10^{-9}$
Образец с МДО №1	0	$1,5 \cdot 10^{-6}$	15	0,01	100	$1,13 \cdot 10^{-11}$
Эталон чугуна №2	0,0002	$1,1 \cdot 10^{-6}$	15	0,018	55,56	$1,55 \cdot 10^{-9}$
Образец с МДО №2	0	$4,8 \cdot 10^{-6}$	15	0,024	41,67	$3,60 \cdot 10^{-11}$
Эталон чугуна №3	0,002	$3,1 \cdot 10^{-6}$	15	0,018	55,56	$1,55 \cdot 10^{-8}$
Образец с МДО №3	0	$2,08 \cdot 10^{-6}$	15	0,02	50	$1,54 \cdot 10^{-10}$

Износостойкость покрытия с сочетанием технологий ХГДН и МДО превосходит износостойкость эталонного образца материала гильз цилиндров (чугуна СЧ25) не менее чем в два раза. Комбинированное покрытие способно работать в нормальных условиях при нагрузке эквивалентной нагрузке на чугун. Хорошие характеристики износостойкости го-

ворят о пригодности применения комбинированного покрытия для восстановления гильз цилиндров.

**Выводы.** Результаты проведенных исследований показали, что применение технологии холодного газодинамического напыления с последующим микродуговым оксидированием для восстановления и упрочнения чугунных гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания обеспечивает повышение их износостойкости более чем в два раза в сравнении с эталонным (новым) изделием.

### Библиографический список

- Каримходжаев Н., Алматаев Т., Одилов Х. Основные причины, вызывающие износ деталей автотранспортных средств, эксплуатирующихся в различных природно-климатических условиях // *Universum: технические науки*. 2020. N5(74). С. 68-71.
- Песковацков Д. Н. Анализ способов восстановления внутренней поверхности гильз цилиндров // *Наука без границ*. 2017. N12(17). С. 55-59.
- Федотов А.В., Дорохов А.С., Гвоздев А.А. Триботехнические материалы для технического обслуживания сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. Т. 60. N4(149). С. 37-45. DOI: 10.22-314/2618-8287-2022-60-4-37-45.
- Баганов Н.А., Павлюк Р.В., Захарин А.В. и др. Совершенствование технологии и оснастки повышения качества ремонта гильз цилиндров автотракторных двигателей // *Технический сервис машин*. 2021. Т. 59. N4(145). С. 95-102. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-95-102.
- Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Применение холодного газодинамического напыления (ХГДН) для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность малых диаметров // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N10. С. 30-36. EDN: ONBIZB.
- Чавдаров А.В. Перспективы использования технологии МДО для двигателей внутреннего сгорания // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N10. С. 65-68. EDN: MTZHTB.
- Комаров А.И., Романюк А.С., Золотая П.С. и др. Повышение гидроабразивной стойкости изделий совмещением методов холодного газодинамического напыления и микродугового оксидирования // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2019. Т. 8. С. 343-347. EDN: LUKZUR.
- Попов Н.А., Чавдаров А.В. Исследование свойств комбинированного покрытия для восстановления изношенных гильз цилиндров // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N1(150). С. 130-139. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-130-139.
- Комаров А.И., Горанский Г.Г. Упрочнение стальных изделий микродуговым оксидированием с исполь-

зованием алюминиевого подслоя, полученного холодным газодинамическим напылением // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2018. N3. С. 75-82.

10. Кузнецов Ю.А., Марков М.А., Красиков А. В. и др. *Формирование износостойких и коррозионностойких керамических покрытий комбинированными технологиями напыления и микродугового оксидирования* // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. N7. С. 819-826. DOI: 10.1134/S0044461819070016.

### References

1. Karimxodjayev N., Almatayev T., Odilov X. *Main factors causing the deterioration of automobile parts which are used in various natural-climate conditions*. *Universum: technical sciences*. 2020. N5(74). 68-71 (In Russian).

2. Peskovatskov D.N. *Analysis of ways to restore the inner surface of cylinder liners*. *Science without borders*. 2017. N12(17). 55-59 (In Russian).

3. Fedotov A.V., Dorokhov A.S., Gvozdev A.A. *Tribotechnical materials for the maintenance of agricultural machinery*. *Machinery technical service*. 2022. Vol. 60. N4(149). 37-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.

4. Baganov N.A., Pavlyuk R.V., Zakharin A.V., et al. *Improvement of technology and equipment for improving the repair quality of cylinder liners of automotive engines*. *Machinery technical service*. 2021. Vol. 59. N4(145). 95-102 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-95-102.

5. Chavdarov A.V., Tolkachev A.A. *The use of cold gas dynamic spraying (CGDN) for coating the inner surface of small diameters*. *Agricultural machinery: maintenance and repair*. 2019. N10. 30-36 (In Russian). EDN: ONBIZB.

6. Chavdarov A.V. *Prospects of using MDO technology for internal combustion engines*. *Agricultural machinery: maintenance and repair*. 2019. N10. 65-68 (In Russian). EDN: MTZHTB.

7. Komarov A.I., Romanyuk A.S., Zolotaya P.S., et al. *Increase of hydraulic formation of products by combination of methods of gas dynamic cold spraying and microarc oxidation*. *Topical issues of mechanical engineering*. 2019. Vol. 8. 343-347 (In Russian). EDN: LUKZUR.

8. Popov N.A., Chavdarov A.V. *Properties of the combined coating for the restoration of worn cylinder liners*. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N1(150). 130-139 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-130-139.

9. Komarov A.I., Goransky G.G. *Hardening of steel products by micro-arc oxidation using an aluminum sublayer obtained by cold gas-dynamic spraying*. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2018. N3. 75-82 (In Russian).

10. Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V., et al.

*Formation of wear-and corrosion-resistant ceramic coatings by combined technologies of spraying and micro-arc oxidation*. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2019. Vol. 92. N7. 819-826 (In Russian). DOI: 10.1134/S00444618190716.

### Заявленный вклад соавторов

Денисов В.А. – научное руководство, анализ результатов исследования; Попов Н.А. – подготовка текста, проведение исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Contributions of the coauthors

Denisov P.A. – scientific guidance, analysis of research results;

Popov N.A. – preparation of the manuscript, conducting research.

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 14.12.2023**

**Статья принята к публикации 21.02.2024**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПАУНДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕМБРАННО-ПОРШНЕВОМ НАСОСЕ**

*Алексей Семенович Дорохов, доктор технических наук, профессор, академик РАН,  
Алексей Сергеевич Свиридов, младший научный сотрудник, e-mail: sviridov.vim@ya.ru  
Сергей Петрович Тужилин, младший научный сотрудник, e-mail: sptuzh@mail.ru*



**Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация**

**Реферат.** Диафрагмы в мембранно-поршневых насосах служат основными рабочими органами, выход из строя которых влечет за собой остановку насоса и всего опрыскивателя, что приводит к снижению эффективности сельскохозяйственной деятельности и повышению расходов на восстановление работоспособности сельскохозяйственного оборудования. Актуальность использования технологии свободного литья двухкомпонентных полиуретанов в силиконовые формы при организации ремонтных участков обусловлена высоким качеством получаемых деталей при существенном сокращении стоимости, а также времени производства. Поскольку основной причиной выхода мембраны из строя является абразивный износ и циклические нагрузки, то определяющими свойствами служат твердость, прочность и пластичность используемых материалов. (Цель исследования) Провести оценку твердости, прочности и пластичности полиуретановых компаундов различных марок в зависимости от режимов изготовления образцов и сделать вывод о возможности применения данных материалов для изготовления диафрагм мембранно-поршневого насоса методом свободного литья. (Материалы и методы) Представили исследования твердости, предела прочности на растяжение и относительного удлинения при разрыве трех марок полиуретановых компаундов PolyFlex 80A, Адваформ Марка 80 и Силагерм 6080 в зависимости от технологических режимов изготовления образцов из них. (Результаты и обсуждение) Установили, что отверждение полиуретановых компаундов при более высоких температурах позволяет обеспечить высокие прочностные и пластические свойства материала. Отметили, что во время отверждения происходит перераспределение молекул в наиболее выгодные энергетические конфигурации, которые исключают появление структурных концентраторов напряжения, увеличивая пластичность и прочность материала. Повышенная температура способствует снятию остаточных напряжений в материале, возникающих во время усадки. (Выводы) Область применения результатов исследования – изготовление полимерных деталей сельскохозяйственной техники, в частности, диафрагм мембранно-поршневого насоса.

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, полиуретановые компаунды, мембранно-поршневой насос, диафрагма, метод свободного литья, силиконовые формы.

**Для цитирования:** Дорохов А.С., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Исследование физико-механических свойств полиуретановых компаундов для оценки возможности их применения в мембранно-поршневом насосе // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 107-112. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-107-112. EDN: TWQWPA.

Research article

**STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES POLYURETHANE  
COMPOUNDS FOR EVALUATION THE POSSIBILITY OF THEIR USE IN A DIAPHRAGM PISTON PUMP**

*Aleksey S. Dorokhov, Dr.Sc.(Eng.), professor,  
Academician of the Russian Academy of Sciences;  
Aleksey S. Sviridov, junior researcher;*

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** *The diaphragms in diaphragm piston pumps serve as the main working parts, the failure of which entails the shutdown of the entire pump, and, as a result, the sprayer, which leads to a decrease in the efficiency of agricultural activities and an increase in the cost of restoring the operability of agricultural equipment. The relevance of using the technology of free casting of two-component polyurethane in silicone molds in the organization of repair sites is due to the high quality of the parts obtained with a significant reduction in cost, as well as production time. Since the main reason for the failure of the membrane is abrasive wear and cyclic loads, the determining properties are hardness, strength and ductility of the materials used. (Research purpose) The research purpose is assessing the hardness, strength and plasticity of polyurethane compounds of various brands, depending on the production conditions of the sample, and concluding their applicability to manufacture piston pump diaphragms by free casting. (Materials and methods) Presented studies of hardness, tensile strength and elongation at break of three grades of polyurethane compounds PolyFlex 80A, Advafarm Mark 80 and Silagerm 6080, depending on the technological modes of manufacturing samples from them. (Results and discussion) It was found that the curing of polyurethane compounds at higher temperatures allows for high strength and plastic properties of the material. It was noted that during curing, molecules are redistributed into the most favorable energy configurations, which exclude the appearance of structural stress concentrators, increasing the plasticity and strength of the material. The increased temperature helps to remove residual stresses in the material that occur during shrinkage. (Conclusions) The application scope of the research results is the manufacture of polymer parts of agricultural machinery, in particular, diaphragm diaphragm piston pump.*

**Keywords:** *physical and mechanical properties, polyurethane compounds, dia-phragm piston pump, diaphragm, method of free casting, silicone moulds.*

**For citation:** *Dorokhov A.S., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Study of physical and mechanical properties polyurethane compounds for evaluation the possibility of their use in a diaphragm piston pump. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 107-112 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-107-112. EDN: TWQWPA.*

Одним из наиболее распространенных средств защиты растений от вредителей и болезней служит обработка растений химическими веществами [1].

Для внесения средств химической защиты применяют различные сельскохозяйственные опрыскиватели. Все виды опрыскивателей состоят из резервуара с инжекторной или гидравлической мешалкой, всасывающей и нагнетательной системы, насоса, регулятора давления, штанги с распылителями, системы фильтрации, гидравлической системы, а также механизма передач. В сельском хозяйстве наиболее распространены насосы мембранно-поршневого типа, которые позволяют точно регулировать объем вносимых опрыскивателем препаратов [2].

Мембранно-поршневые насосы обладают рядом преимуществ: малый вес, компактный размер, низкая стоимость, универсальность применения. К их недостаткам можно отнести износ рабочего

органа (диафрагмы) насоса в процессе работы, из-за чего возникают кавитации потока рабочей жидкости. Диафрагмы мембранно-поршневых насосов нуждаются в периодической замене [3].

Современные подходы к обеспечению надежности сельскохозяйственной техники свидетельствуют о все возрастающей тенденции самостоятельного изготовления запасных полимерных частей при ремонте [4].

Поскольку не всегда необходимые запчасти присутствуют в продаже, такой подход позволяет значительно экономить материальные и временные ресурсы. Для изготовления полимерных запасных частей наиболее часто применяют аддитивные технологии, однако изготовление эластомерных деталей с их помощью затруднено [5].

Одной из перспективных технологий изготовления эластомерных запчастей для сельскохозяйственной техники, в том числе и диафрагм мембранно-поршневых насосов, является метод сво-



бодного литья, представляющий собой литье двух-компонентных полиуретановых компаундов в силиконовые формы [6].

**Цель исследования** – провести оценку твердости, прочности и пластичности полиуретановых компаундов различных марок в зависимости от режимов изготовления образцов и сделать вывод о возможности применения данных материалов для изготовления диафрагм мембранно-поршневого насоса методом свободного литья.

**Материалы и методы.** Анализ отечественного рынка полиуретановых компаундов, близких по заявленным физико-механическим свойствам к материалам, из которых в настоящий момент изготавливают диафрагмы мембранно-поршневого насоса, показал, что наиболее интересными для изучения являются три марки: *PolyFlex 80A*, Адваформ Марка 80 и Силагерм 6080.

Для оценки физико-механических свойств выбранных марок полиуретанов были подготовлены образцы с различными режимами изготовления. Варьировались следующие факторы: наличие или отсутствие операции вакуумирования перед отливкой; отверждение образца при комнатной или при повышенной температуре после отливки (табл.).

Таблица Table  
Режимы изготовления образцов из полиуретановых компаундов  
*Production conditions of polyurethane compound samples*

Режим	Количество образцов
Дегазация в вакуумной камере, отверждение в сушильном шкафу 24 ч. при температуре 40-45°C	3
Дегазация в вакуумной камере, отверждение 24 ч. при комнатной температуре	3
Дегазацию не выполняли, отверждение в сушильном шкафу 24 ч. при температуре 40-45°C	3
Дегазацию не выполняли, отверждение 24 ч. при комнатной температуре	3

Смешивание и вакуумирование компаундов проводили в вакуумной камере с вакуумным насосом *Valve* (рис. 1).

Длительность вакуумирования – 5 мин при давлении 5-10<sup>-3</sup> бар. Вакуумирование перед заливкой способствует удалению из смеси воздуха и паров воды, что повышает качество отливки.

Отверждение образцов при повышенной температуре проводили в сушильном шкафу *Binder ED 53* (рис. 2). Повышенная температура способствует возрастанию кинетической энергии молекул реагирующих компонентов, что увеличивает

количество швов и обеспечивает равномерное распределение свойств по объему изделия. Увеличение числа швов в свою очередь повышает прочность изделия [7].



Рис. 1. Вакуумная камера с вакуумным насосом  
Fig. 1. Vacuum chamber with vacuum pump



Рис. 2. Сушильный шкаф Binder ED 53  
Fig. 2. Binder ED 53 drying cabinet

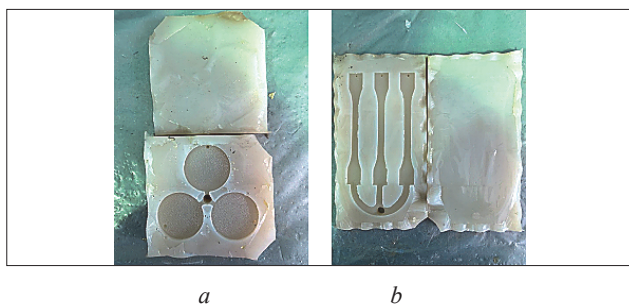
Измерение твердости полученных образцов осуществляли с помощью твердомера ТВР-А согласно требованиям ГОСТ 263-75. На каждом образце проводили по 15 измерений с последующим расчетом среднего арифметического из полученных значений.

Измерение прочности при растяжении выполняли на универсальной испытательной машине И11М согласно требованиям ГОСТ 11262-2017. Испытания проводили при скорости нагружения образцов 300 мм/мин. Каждая серия испытания состояла из трех образцов.

Всего было изготовлено 24 образца двух типов: для определения твердости – 12 круглых образцов диаметром 50 мм и толщиной 6 мм, для определения прочности и пластичности – 12 образцов типа 1В согласно ГОСТ 11262-2017.

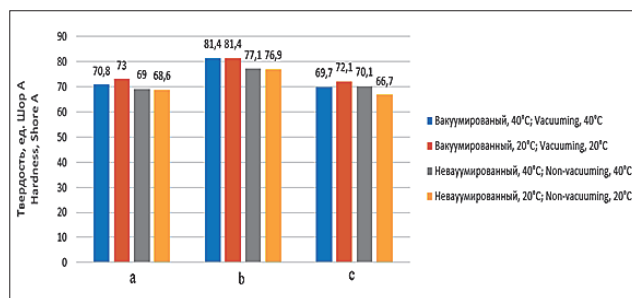
Силиконовые формы, при помощи которых из-

готовавляли образцы для соответствующих испытаний, привели на *рисунке 3*.

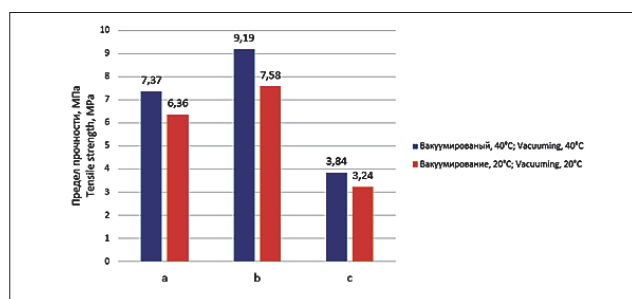


*Рис. 3. Формы для изготовления образцов: а – для испытаний на твердость; б – для испытаний на прочность и пластичность*  
*Fig. 3. Moulds for making samples: a – for hardness tests; b – for strength and plasticity tests*

**Результаты и обсуждение.** Результаты испытаний образцов на твердость привели на *рисунке 4*. Среднеквадратическое отклонение (СКО) результатов используется для оценки равномерности свойств по объему образцов (*рис. 5*).



*Рис. 4. Твердость образцов в зависимости от режима: а – PolyFlex 80A; б – Силагерм 6080; с – Адваформ Марка 80*  
*Fig. 4. Hardness of samples depending on the mode: a – PolyFlex 80A; b – Silagerm 6080; c – Advaform Mark 80*



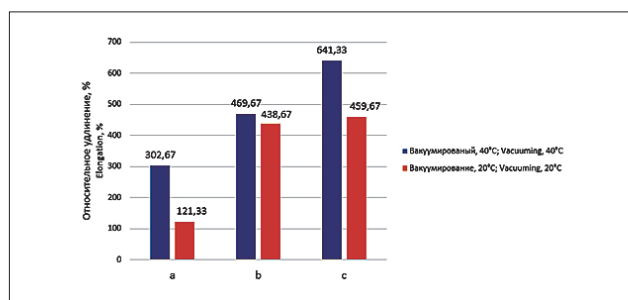
*Рис. 5. СКО значений твердости образцов в зависимости от режима: а – PolyFlex 80A; б – Силагерм 6080; с – Адваформ Марка 80*  
*Fig. 5. Standard deviation of hardness values of samples depending on the mode: a – PolyFlex 80A; b – Silagerm 6080; c – Advaform Mark 80*

Отметили, что СКО значений твердости у образцов из полиуретанов марок *PolyFlex 80A* и Си-

лагерм 6080, отверждаемых при температуре 40 °С, меньше, чем у образцов, отверждаемых при температуре 20 °С. Это можно объяснить более равномерным распределением свойств по объему образцов за счет большей подвижности молекул композиции. Большей твердостью обладают образцы, отверждавшиеся при температуре 20 °С с предварительным вакуумированием смеси. Возможно, дополнительной тепловой энергии было достаточно для перераспределения молекул реагирующих компонентов, но недостаточно для образования большего числа сшивок. В случае с образцами, отверждавшимися при более низкой температуре, перераспределения молекул не было, в результате чего возникли крупные локальные участки с большим числом сшивок, обуславливающих высокую твердость образца [8].

В случае с полиуретаном Адваформ Марка 80 наблюдается обратное – образцы, отверждавшиеся при температуре 40 °С, имеют большее СКО значений твердости, чем образцы, отверждавшиеся при температуре 20 °С. Это можно объяснить преобладанием процессов сшивки реагентов над процессами перемещения молекул. Поскольку твердость образцов, отверждавшихся при температуре 20 °С с предварительным вакуумированием смеси наиболее высокая, можно предположить, что при более высокой температуре наряду с неравномерным процессом сшивки возникали процессы разрушения сшивок. Наиболее высокой твердостью обладают образцы из полиуретана марки Силагерм 6080. При этом оптимальный режим изготовления образцов включает этап предварительного вакуумирования и отверждения при температуре 40 °С, поскольку в таком случае получается наивысшая твердость при минимальном СКО значений твердости [9].

Результаты испытаний на прочность и пластичность привели на *рисунках 6, 7*.



*Рис. 6. Средние значения предела прочности образцов в зависимости от режима: а – PolyFlex 80A; б – Силагерм 6080; с – Адваформ Марка 80*  
*Fig. 6. Average strength values of samples depending on the mode: a – PolyFlex 80A; b – Silagerm 6080; c – Advaform Mark 80*

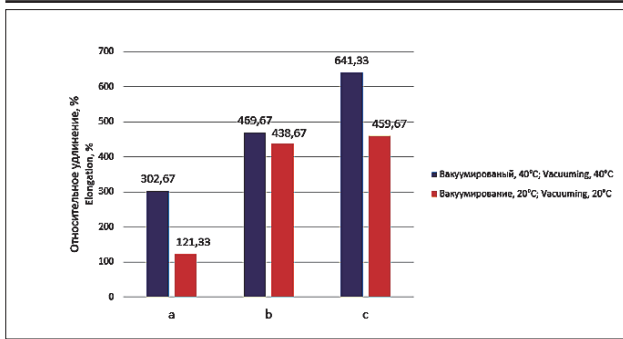


Рис. 7. Средние значения относительного удлинения образцов в зависимости от режима: а – PolyFlex 80А; б – Силагерм 6080; в – Адваформ Марка 80

Fig. 7. Average values of relative elongation of samples depending on the mode: a – PolyFlex 80A; b – Silagerm 6080; c – Advaform Mark 80

В целом можно утверждать, что отверждение при более высокой температуре обеспечивает более высокие прочностные и пластические свойства материала. Скорее всего, это связано с перераспределением молекул во время отверждения в наиболее выгодные энергетические конфигурации, которые исключают появление структурных концентраторов напряжения, увеличивая пластичность и прочность материала [10].

Повышенная температура способствует снятию остаточных напряжений в материале, возникающих во время усадки.

**Выводы.** По результатам исследования можно сделать выводы, что наиболее подходящим материалом для изготовления диафрагм мембранно-поршневых насосов служит полиуретан марки Силагерм 6080. При этом технология изготовления мембраны с использованием свободного литья должна предусматривать дегазацию компаунда для получения оптимальных физико-механических свойств и отверждение при температуре 40 °С.

Полиуретан Адваформ Марка 80 также удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диафрагмам мембранно-поршневого насоса. Поэтому необходимы дополнительные исследования технологических и эксплуатационных свойств данных материалов.

### Библиографический список

1. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
2. Щеголихина Т.А. Анализ основных показателей технического уровня штанговых опрыскивателей //

*Техника и оборудование для села*. 2014. N5. С. 10-12.

3. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Соломашкин А.А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин // *Технический сервис машин*. 2020. Т. 58. N1(138). С. 50-57. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57.

4. Башкирев А.П., Шварц А.А., Шкабенко А.Ю. Анализ работы полевых опрыскивателей // *Наука в центральной России*. 2019. N6(42). С. 50-58. DOI: 10.35887/2305-2538-2019-6-50-58.

5. Свиридов А.С., Тужилин С.П., Лопатина Ю.А. Использование цифровой 3d-фермы в ремонтном производстве сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2019. Т. 57. N1(134). С. 93-99. EDN: NCZBEB.

6. Дорохов А.С., Денисов В.А., Соломашкин А.А. и др. Стратегии технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин // *Технический сервис машин*. 2020. Т. 58. N3(140). С. 38-48. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48.

7. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2021. Т. 59. N3(144). С. 146-154. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154.

8. Тужилин С.П., Лопатина Ю.А., Свиридов А.С. Переработка полимерных материалов методом свободного литья в вакууме // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. N7. С. 93-100. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-93-100.

9. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Баулин Н.К. и др. Техническое сопровождение сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. Т. 60. N2(147). С. 51-59. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-51-59.

10. Денисов В.А., Славкина В.Э., Алехина Р.А. и др. Повышение долговечности деталей экстерьера сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N4(153). С. 90-96. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-90-96.

### References

1. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural engineering*. 2021. N1(101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
2. Shchegolikhina T.A. Analysis of key indicators of boom sprayers technical level. *Machinery and equipment for rural area*. 2014. N5. 10-12 (In Russian).
3. Chernoiivanov V.I., Denisov V.A., Solomashkin A.A. How to determine the remaining life of machine parts. *Machinery technical service*. 2020. Vol. 58. N1(138). 50-57. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57.
4. Bashkirev A.P., Schwartz A.A., Shkabenco A.Yu. Analysis of the work of field sprayers. *Science in the central*

Russia. 2019. N6(42). 50-58 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2019-6-50-58.

5. Sviridov A.S., Tuzhilin S.P., Lopatina Yu.A. The use of digital 3D-farm for use in the repair of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2019. Vol. 57. N1(134). 93-99. EDN: NCZBEB.

6. Dorokhov A.S., Denisov A.V., Solomashkin A.A., et al. Strategies of maintenance and repair of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2020. Vol. 58. N3(140). 38-48. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48.

7. Goncharova Yu.A., Denisov V.A. Failures of polymer parts of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2021. Vol. 59. N3(144). 146-154. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154.

8. Tuzhilin S.P., Lopatina Yu.A., Sviridov A.S. Processing polymer materials by free casting under vacuum. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. N7. 93-100 (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-93-100.

9. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Baulin N. K., et al. Technical support of agricultural machinery. *Machinery technical service*. 2022. Vol. 60. N2(147). 51-59 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-51-59.

10. Denisov V.A., Slavkina V.E., Alehina R.A., et al. Increasing the durability of exterior parts of agricultural machinery using composite materials. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N4(153). 90-96. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-90-96.

review, finalizing the manuscript and general conclusions, paper layout and formation.

The authors read and approved the final manuscript.  
The authors read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 27.12.2023**

**Статья принята к публикации 16.02.2024**

#### **Заявленный вклад соавторов**

*Дорохов А.С. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;*

*Свиридов А.С. – разработка методики исследований, выбор и обоснование основных исследуемых параметров, проведение испытаний, формирование общих выводов;*

*Тужилин С.П. – обработка результатов исследования, литературный анализ, верстка и формирование работы, подготовка материала к публикации.*

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

*Dorohov A.S. – scientific guidance, formulation of the research concepts;*

*Sviridov A.S. – development of research methodology, selection and justification of the main study parameters, conducting experiments, formation of general conclusions;*

*Tuzhilin S.P. – research results processing, literature*



300-летию Российской академии наук посвящается

**Вклад академика ВАСХНИЛ А.И. Селиванова**

**в подготовку научно-педагогических и агроинженерных кадров России**



*Михаил Никитьевич Ерохин, доктор технических наук,  
профессор, РАН;*

*Дмитрий Михайлович Скороходов, кандидат технических наук,  
доцент, e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru*

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени  
К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация*

**Реферат.** Развитие инженерного образования в России играет важную роль в создании технологий будущего, разработке новых изобретений. (Цель исследования) Сформировать патриотическое отношение к инженерному образованию в России на примере деятельности видного ученого в области механизации и электрификации сельского хозяйства, доктора технических наук, профессора, академика ВАСХНИЛ Александра Ивановича Селиванова. (Материалы и методы) Провели анализ литературных источников путем применения историко-аналитического метода. Использовали в качестве материалов современные и исторические литературные источники, материалы конференций, научные статьи, военно-исторические материалы, оригинальные научные труды А.И. Селиванова. (Результаты и обсуждение) Изложили жизненный и творческий путь А.И. Селиванова. После окончания факультета индустриального земледелия Ленинградского политехнического института А.И. Селиванов проделал путь от инженера, руководителя лаборатории до заместителя директора по научной работе ВИМ, ГОСНИТИ, Сибирского НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства. (Выводы) Значительный цикл его работ направлен на разработку систем технического обслуживания и ремонта машин и рациональной организации ремонтной базы. А.И. Селиванов – основоположник теории старения машин, соавтор учебника «Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники». Под его руководством и с его непосредственным участием была разработана типовая технология ремонта тракторов и комбайнов, служившая многие годы основным техническим документом для всех ремонтных предприятий. А.И. Селиванов внес огромный вклад в подготовку научно-педагогических и агроинженерных кадров России. Его трудолюбие, смелость, отвага, героизм, упорство и многие другие качества, которые необходимы нашему подрастающему поколению, служат настоящим примером для многих людей.

**Ключевые слова:** А.И. Селиванов, ремонт машин, инженерное образование, износ сельскохозяйственных машин, техническое обслуживание, топливная аппаратура, теория старения машин.

**Для цитирования:** Ерохин М.Н., Скороходов Д.М. Вклад академика ВАСХНИЛ А.И. Селиванова в подготовку научно-педагогических и агроинженерных кадров России // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 113-120. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-113-120. EDN: MQZSGK.

**Analytical article**

*Dedicated to the 300th anniversary of the Russian academy of sciences*

**CONTRIBUTION OF ACADEMICIAN OF VASKhNIL A.I. SELIVANOVA IN THE TRAINING  
OF SCIENTIFIC, PEDAGOGICAL AND AGRICULTURAL ENGINEERING PERSONNEL IN RUSSIA**

*Mikhail N. Erokhin, Dr.Sc.(Eng), professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences; Dmitry M. Skorokhodov, Ph.D.(Eng.) associate professor*

*Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** *The development of engineering education in Russia plays an important role in the creation of future technologies, the development of new inventions. (Research purpose) The research purpose is forming a patriotic attitude to engineering education in Russia on the example of the activities of a prominent scientist in the field of mechanization and electrification of agriculture, Doctor of Technical Sciences, Professor, academician of the VASHNIL Aleksandr Ivanovich Selivanov. (Materials and methods) The analysis of literary sources was carried out by applying the historical and analytical method. Modern and historical literary sources, conference materials, scientific manuscripts, military-historical materials, original scientific works of A.I. Selivanov were used as materials. (Results and discussion) They outlined the life and creative path of A.I. Selivanov. After graduating from the Faculty of Industrial Agriculture of the Leningrad Polytechnic Institute, A.I. Selivanov worked his way up from an engineer; head of a laboratory, to deputy director for scientific work of VIM, GOSNITI, Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture. (Conclusions) A significant cycle of his work is aimed at developing maintenance and repair systems for machines and the rational organization of the repair base. A.I. Selivanov is the founder of the theory of aging of machines, co-author of the textbook "Theoretical foundations of repair and reliability of agricultural machinery." Under his leadership and with his direct participation, a standard tractor and combine repair technology was developed, which served for many years as the main technical document for all repair enterprises. A.I. Selivanov made a huge contribution to the training of scientific, pedagogical and agroengineering personnel in Russia. His diligence, courage, bravery, heroism, perseverance and many other qualities that are necessary for our younger generation serve as a real example for many people.*

**Keywords:** *A.I. Selivanov, machine repair, engineering education, wear of agricultural machines, maintenance, fuel equipment, theory of machine aging.*

**For citation:** *Erokhin M.N., Skorokhodov D.M. Contribution of Academician of VASKhNIL A.I. Selivanov in the training of scientific, pedagogical and agricultural engineering personnel in Russia. Machinery technical services. 2024. Vol. 62. N1(154). 113-120. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-113-120. EDN: MQZSGK.*

**И**нженерное образование в России играет важную роль для развития страны [1].

Оно помогает создавать новые технологии и изобретения, направленные на улучшение жизни людей, в том числе современные автоматизированные технические средства в сельскохозяйственной отрасли. В связи с этим ставится вопрос о подготовке научно-педагогических и агроинженерных кадров России, которые будут развивать и совершенствовать данное направление [2].

Одним из известных ученых страны в сельскохозяйственной отрасли является Александр Иванович Селиванов. Патриотическое воспитание, трудолюбие, увлеченность ремонтом сельскохозяйственных машин позволили ему стать не только талантливым ученым, но и уникальным педагогом, организовавшим школу научно-педагогических кадров по научным основам промышленного ремонта сельскохозяйственной техники.

**Цель исследования** – сформировать патриотическое отношение к инженерному образованию в России на примере деятельности видного ученого в области механизации и электрификации сельского хозяйства, доктора технических наук, профессора, академика ВАСХНИЛ Александра Ивановича Селиванова.

**Материалы и методы.** Провели анализ литературных источников путем применения историко-аналитического метода. В качестве материалов использовали современные и исторические литературные источники, материалы конференций, научные статьи, военно-исторические материалы, интернет ресурсы, оригинальные научные труды А.И. Селиванова. Все использованные материалы и историко-аналитический метод позволили в полном объеме отразить жизнь и творчество, а также вклад Селиванова в подготовку научно-педагогических и агроинженерных кадров России.

**Результаты и обсуждение.** 14 августа 2023 г. исполнилось 115 лет со дня рождения выдающегося ученого в области механизации и электрификации сельского хозяйства А.И. Селиванова (рис. 1).

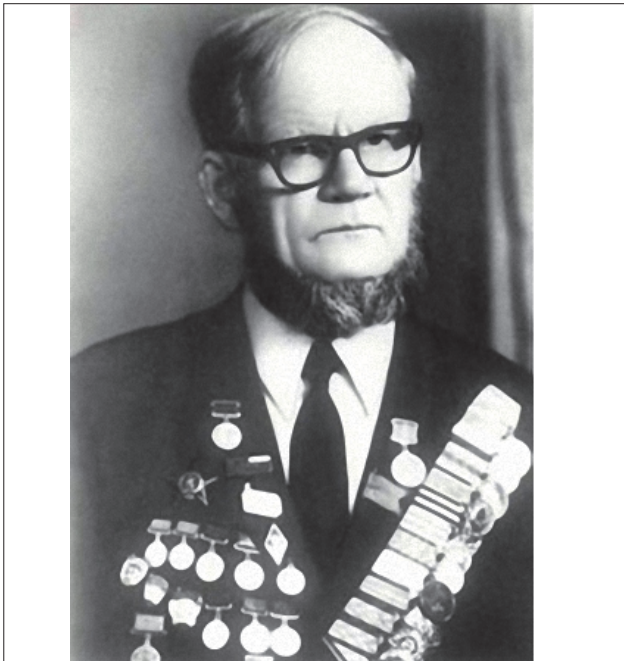


Рис. 1. А.И. Селиванов (1908-1976 гг.)

Fig. 1. A.I. Selivanov (1908-1976)

Жизнь и творчество А.И. Селиванова можно рассматривать: с одной стороны, как талантливо-го ученого, основоположника теории старения машин, с другой стороны – профессора-педагога, организатора школы научно-педагогических кадров по научным основам индустриального ремонта сельскохозяйственной техники.

Представляет интерес его необычная биография. Сын крестьянина, без особых средств и связей, но, несомненно, талантливый, энергичный, благодаря своему трудолюбию становится известным академиком, основоположником теории старения и надежности сельскохозяйственной техники.

А.И. Селиванов родился в таежной деревне Вторая Борисовская, с 1937 г. относящейся к Ленскому району Архангельской области (зона Крайнего Севера) [3].

С детских лет, как и все деревенские ребята-шки тех лет, он помогал в хозяйстве своему отцу, познавая нелегкий крестьянский труд, поэтому свою профессию, а, следовательно, и учебные заведения он выбирал осознанно. После окончания семи классов школы Селиванов поступил в Велико-Устюгский сельскохозяйственный техникум, а затем в один из лучших технических вузов России – Ленинградский политехнический институт на фа-

культет индустриального земледелия. В настоящее время этот вуз называется Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) и входит в пятерку лучших технических вузов страны.

С 1925 г. параллельно с учебой он работает механиком по настройке зерноочистительных машин в Ленском кредитном товариществе, грузчиком в Ленинградском порту, рабочим на заводе им. К. Маркса, механиком в Вологодской машинно-тракторной мастерской, рабочим в совхозе по сборке и испытанию сельскохозяйственных машин и тракторов, на Путиловском заводе в тракторном цехе.

По окончании института в 1931 г., получив фундаментальное инженерное образование и хорошую рабочую закалку, он был направлен на работу во Всесоюзный научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства (ВИМ), организованный в 1930 г. [4].

Тридцатые годы прошлого века характеризовались активным становлением отечественного тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. За несколько лет были построены и пущены в строй Сталинградский (1931 г.), Харьковский (1932 г.), Челябинский (1933 г.) тракторные заводы [5].

При массовом производстве тракторов, сельскохозяйственной техники и их поступлении в сельское хозяйство стали разрабатываться и активно использоваться машинные технологии возделывания сельскохозяйственных культур [6].

Для эффективного использования и поддержания техники в работоспособном состоянии в стране возникла необходимость создания системы ее технического обслуживания и индустриального ремонта.

А.И. Селиванов с первых шагов самостоятельной деятельности попал в творческую среду, на которую было возложено решение данных задач. Работая инженером, руководителем группы, руководителем лаборатории ремонта техники, он активно занимался исследованиями износа сельскохозяйственных машин, разработкой системы их технического обслуживания и ремонта. С его непосредственным участием и под его руководством в 1931-1941 гг. были разработаны первые правила технического ухода за тракторами и нормы расхода запасных частей к ним (изданы в 1932 г.), оборудование для ремонтных мастерских, создано контрольно-испытательное и ремонтно-технологическое оборудование для технического обслуживания и ремонта дизельной топливной аппаратуры.

Вероломное нападение фашистов прервало мирный труд советских народов. А.И. Селиванов ушел



на фронт с первых дней войны (рис. 2). С июня 1941 по май 1944 г. он в звании инженера-капитана служил помощником командира автотранспортного батальона 5-й армии Западного фронта.



Рис. 2. А.И. Селиванов на фронте  
Fig. 2. A.I. Selivanov at the front

На фронте Селиванов занимался не только ремонтом и обслуживанием военной техники, но и стремился поддерживать боевой дух подчиненных. По его воспоминаниям: «На фронте практически не было затишья, почти всегда стреляли. Но если нет наступления или подготовки к нему, нет или мало ночных операций, стороны окопались и стоят на постоянных позициях – это и есть затишье. В эти часы однополчане спрашивали друг друга: «Как реагировать на такую ситуацию, когда ты попал под обстрел или под бомбежку?» Я обычно отвечал довольно стандартной фразой: «Исполнять свой долг!» Это, во-первых, очень простой совет, во-вторых, в-третьих и в-сотых, – он очень емкий. Он быстро приходит в голову, успокаивает, ставит все на свое место, отбрасывая далеко в сторону обстановку, которая сложилась рядом, заставляет действовать спокойно и деловито. Человек становится собранным, и хорошо, четко сообщая, делает то, что надлежит.

Позднее мне многие говорили, что этот совет им помогал. А те, кто от грохота и взрывов ложился вниз лицом в ближайшую канаву или прятался в кустах, чаще всего на фронте погибали быстро. Еще помогала в такой ситуации древняя восточная пословица, которую я усиленно внедрял в своем батальоне: «Трус умирает от царапины – раны храброго заживают быстро». В нашем батальоне эту пословицу знали все».

Находясь на фронте, А.И. Селиванов карандашом изобразил свою землянку, в которой с инже-

нерной точностью были зафиксированы все детали внутреннего убранства (рис. 3).

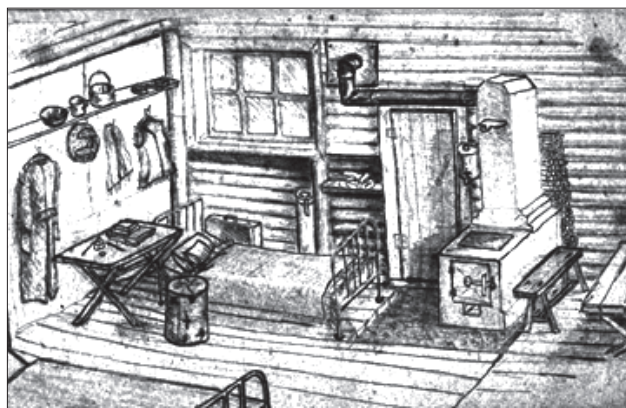


Рис. 3. В землянке (рисунок А.И. Селиванова)  
Fig. 3. In the dugout (drawing by A.I. Selivanov)

Поражает, что А.И. Селиванов не думал о сохранении жизни. Он, стремясь сохранить накопленные материалы по ремонту дизельной топливной аппаратуры, в часы затишья на фронте продолжал исследования и написал книгу объемом 22,5 п. л. (352 стр.) «Дизельная топливная аппаратура», в которой были изложены устройство, ремонт и регулировки топливной аппаратуры тракторных, автомобильных и судовых двигателей. Эта книга выпущена массовым тиражом издательством «Сельхозгиз» в 1944 г. Она в последующем неоднократно переиздавалась и служила многие годы пособием не только для подготовки специалистов массовой профессии по топливной аппаратуре, ее активно использовали студенты вузов для выполнения курсовых и дипломных проектов. В мае 1944 г. по Постановлению Государственного комитета обороны (ГКО) от 1 марта 1944 г. он был отозван из армии.

Вернувшись с фронта, Селиванов вновь возглавил лабораторию ремонта тракторов, где приступил к разработке нормативов расхода запасных частей и материалов, технической документации по ремонту не только сельскохозяйственных тракторов, но и артиллерийских тягачей. В 1947 г. он защищает кандидатскую диссертацию на тему: «Очистка дизельного топлива при отстое и фильтрации». По результатам исследований автором были сконструированы фильтры для заправки тракторов дизельным топливом, которые длительное время широко использовались в практике механизаторов.

За цикл работ 1948-1949 гг. по созданию технологии и оборудования для ремонта базисных деталей тракторов, широко внедренных в ремонт-



ное производство, А.И. Селиванову, П.С. Кучумову, М.А. Луканову и А.Ф. Бондаренко в 1951 г. была присуждена Государственная премия СССР второй степени. О масштабах и актуальности работ, выполненных под руководством А.И. Селиванова и при его участии, свидетельствует следующий факт. В 1949-1953 гг. в ВИМе под руководством А.И. Селиванова и П.С. Кучумова была создана и издана типовая технология ремонта тракторов и комбайнов, которая состояла из 22 альбомов общим объемом 2000 п. л. и долгие годы служила основной технической документацией для всех ремонтных предприятий сельского хозяйства.

В пятидесятые годы в связи с массовым оснащением сельского хозяйства сельскохозяйственной техникой, в стране возникла острая необходимость в поддержании ее в работоспособном состоянии. Потребовалось научное обоснование совершенствования и развития технической эксплуатации, разработка ремонтно-технологического обслуживания, промышленной технологии ремонта и восстановления техники, нормативно-технической документации [7].

Существующие в стране на тот период несколько малочисленных научных лабораторий были не в состоянии оперативно выполнять насущные задачи. По инициативе А.И. Селиванова, руководство Министерства сельского хозяйства (И.А. Бенедиктов, П.С. Кучумов, Л.А. Корбут) добилось создания специального научно-технологического института. В результате приказом по Минсельхозу СССР от 04.11.1953 г. № 918 был организован Государственный научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации тракторов и сельскохозяйственных машин (ГОСНИТИ), на который возлагалось научное сопровождение поставленных выше задач [8]. Естественно, что исполнение обязанностей первого директора института было возложено на А.И. Селиванова. В последующем, вплоть до 1969 г. включительно, он работал заместителем директора института по научной работе.

Параллельно с выполнением своих прямых обязанностей А.И. Селиванов вел огромную общественную работу. Он неоднократно избирался депутатом Перовского городского Совета депутатов трудящихся г. Москвы, состоял членом редакционных советов издательства «Машиностроение», журнала «Техника в сельском хозяйстве», членом диссертационных советов институтов ВИМ, ВИЭСХ, МИИСП, ГОСНИТИ и др. Многие годы он активно работал в экспертном Совете ВАК.

О режиме работы А.И. Селиванова красноречиво говорят воспоминания профессора Н.Ф. Тельнова. С Александром Ивановичем он познакомился еще в студенческие годы, выполняя дипломный проект по ремонту дизельной топливной аппаратуры. У дипломника возникли вопросы к Селиванову как автору книги «Дизельная топливная аппаратура». Будущий ученый был поражен режимом работы Селиванова и восхищен его работоспособностью. А.И. Селиванов назначил ему, студенту-дипломнику, встречу на 6 часов утра! «Это был обычный распорядок дня для заместителя директора ВИМ по научной работе: «До начала основной работы еще не мешают подчиненные, можно «поработать для души», – говорил Александр Иванович». Дело было зимой. Во всем здании ВИМ, куда Тельнов прибыл к установленному часу, светило лишь одно окошко. Они проговорили около двух часов. В последующем он курировал Николая Фёдоровича вплоть до его защиты докторской диссертации [9].

Целеустремленность, ежедневная напряженная работа, большие организаторские способности и талант А.И. Селиванова показывали необыкновенные результаты. Он автор 250 научных трудов, включая 5 монографий, 30 популярных книг и брошюр, отдельные из них были переведены и изданы в Румынии, Польше, Чехословакии, Болгарии, ГДР, Испании.

В 1959 г. он защитил в Ленинградском сельскохозяйственном институте докторскую диссертацию на тему: «Теоретические основы системы технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве», которая в дальнейшем легла в основу создания теории старения машин, разработки методики рационального построения ремонтной базы сельского хозяйства и разработки соответствующих нормативов для ее расчетов.

В 1965 г. под его руководством и непосредственно с его участием были созданы нормативы потребности сельского хозяйства в техническом обслуживании и ремонте машинно-тракторного парка и подготовлена методика расчета ремонтной базы сельского хозяйства по областям (краям) и республикам.

Своими работами А.И. Селиванов оказал огромное влияние на подготовку инженерных и научно-педагогических кадров. Монография А.И. Селиванова «Основы теории старения машин», выпущенная издательством «Машиностроение» в 1964 г., до настоящего времени служит настольной книгой аспирантов и всех исследователей, работаю-

щих в направлении повышения надежности и ремонтпригодности машин [10].

Пройдя по конкурсу в 1965 г. на должность профессора кафедры ремонта машин Московского института инженеров сельскохозяйственного производства (по совместительству), он первый в стране создал и прочитал студентам курс «Теоретические основы ремонта машин» (1968 г.). Следует отметить, что в числе первых слушателей нового курса был и один из авторов этих строк. Лекции отличались своей содержательностью и были направлены не на изложение неоспоримых фактов и последующее их заучивание, а на развитие творческого мышления. В 1978 г., уже после смерти Селиванова, на основе этого курса был издан учебник «Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники» в соавторстве с Ю.Н. Артемьевым, по которому учились многие поколения студентов. Этот учебник лег в основу современного курса надежности сельскохозяйственной техники для студентов, обучающихся по направлению «Агроинженерия».

С 1969 г. Селиванов заведовал кафедрой ремонта машин по совместительству. Особое внимание он уделял аспирантам. Свой рабочий день на кафедре он всегда начинал с обхода их рабочих мест, интересовался, как идут исследования, какие трудности, какая необходима помощь.

На кафедре регулярно проводились обсуждения хода работ аспирантов, предварительная защита диссертаций. Если учесть, что на кафедру в те времена принимали по 10-15 аспирантов ежегодно, можно представить, что этот процесс шел непрерывно [11].

С каждым аспирантом работали по 5-6 студентов, приобщаясь к научным исследованиям.

В 1969 г. было принято решение создать в Новосибирской области научный центр – академический городок. А.И. Селиванов сразу же согласился на призыв Правительства поехать в Новосибирск, не боясь трудностей в организации, смело взялся за новое дело и до конца своих дней работал в должности заместителя директора Сибирского НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства по научной работе и с 1970 по 1976 г. – заведующим кафедрой ремонта машин в Новосибирском сельскохозяйственном институте.

Заслуги А.И. Селиванова были по достоинству оценены. В 1956 г. он был избран членом-корреспондентом ВАСХНИЛ, в 1970 – академиком ВАСХНИЛ. За боевые заслуги во время Великой Отечественной войны награжден орденом Красной Звез-

ды (1944 г.), медалью «За Отвагу» и другими медалями. За руководство научно-исследовательской и практической работой в области эксплуатации и ремонта машин в сельском хозяйстве награжден тремя орденами «Трудового Красного Знамени» (1949, 1954, 1967 гг.), орденом «Знак Почета» (1945 г.) и многими другими наградами.

Вся трудовая деятельность А.И. Селиванова на протяжении всей его яркой жизни отличалась исключительной преданностью делу, безупречной обязательностью, глубокой порядочностью. Он и в отпуске не переставал трудиться. На *рисунке 4* А.И. Селиванов в кругу семьи.



*Рис. 4. В кругу семьи*

*Fig. 4. With family*

А.И. Селиванов скончался 10 октября 1976 г.

Память о А.И. Селиванове сохраняется в семье и передается поколениям. Достойными продолжателями творческой деятельности А.И. Селиванова стали А.И. Черноиванов, Э.В. Северный, Е.И. Базаров, В.П. Лялякин, В.М. Михлин, М.А. Халфин, А.Ю. Измайлов, А.С. Дорохов и многие другие исследователи, каждому из которых можно посвятить отдельное внимание [12].

**Выводы.** Несмотря на трудное детство А.И. Селиванова, прошедшие в тяжелых таежных условиях Ленского района Архангельской области, именно трудолюбие позволило сыну крестьянина стать известным академиком, основоположником теории старения и надежности сельскохозяйственной техники. Свои научные знания Александр Иванович применял и в военное время, о чем свидетельствуют его фронтовые заметки. В военные годы, находясь на фронте, А.И. Селиванов написал книгу объемом 22,5 п. л. (352 стр.) под названием «Дизельная топливная аппаратура», которая служила многие годы пособием не только для подго-

товки специалистов массовой инженерной профессии по топливной аппаратуре, ее активно использовали студенты вузов для выполнения курсовых и дипломных проектов.

А.И. Селиванов внес огромный вклад в подготовку научно-педагогических и агроинженерных кадров России. Его монография «Основы теории старения машин», выпущенная в 1964 г., до настоящего времени является настольной книгой аспирантов и всех исследователей, работающих в направлении повышения надежности и ремонтпригодности машин.

Биография А.И. Селиванова и такие его черты, как трудолюбие, смелость, отвага, героизм, упорство и многие другие качества, служат настоящим примером для нашего подрастающего поколения.

### Библиографический список

1. Ценч Ю.С. Становление и развитие агроинженерных высших учебных заведений России. М.: ВИМ. 2020. 62 с. EDN: MEUUBM.
2. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технологии цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения. Агроинженерия. 2023. Т. 25. №4. С. 14-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
3. Черноиванов В.И. К 100-летию Александра Ивановича Селиванова // Труды ГОСНИТИ. 2008. Т. 102. С. 1-12.
4. Измайлов А.Ю. ВИМ: история становления и развития // История науки и техники. 2019. №12. С. 3-10. EDN: TLBZCP.
5. Кутьков Г.М., Ерохин М.Н., Дидманидзе О.Н. и др. Академик ВАСХНИЛ Василий Николаевич Болтинский // Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина. 2019. №1(89). С. 66-72. EDN:YXZTVZ.
6. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г. и др. Определение показателей уровня техногенного воздействия технологического комплекса машин на уборке овощных культур // Агроинженерия. 2023. Т. 25. №2. С. 15-18. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-15-18.
7. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин М.: ВИМ. 2022. 284 с.
8. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. История организации ГОСНИТИ // Технический сервис машин. 2020. Т. 58. №4(141). С. 165-175. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-4-165-175.
9. Ерохин М.Н., Апатенко А.С. Вся жизнь в творчестве // Агроинженерия. 2023. Т. 25. №5. С. 84-88. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-84-88.
10. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Александр Иванович Селиванов – основатель теории старения машин // Технический сервис машин. 2023. Т. 61. №4(153). С. 109-115. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-109-115.
11. Ценч Ю.С. Система непрерывного образования в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. №4. С. 11-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-11-13.
12. Shepvalova O.V., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., et al. High-efficiency photovoltaic equipment for agriculture power supply. Agriculture. 2023. Vol. 13. №1234. DOI: 10.3390/agriculture13061234.

### References

1. Tsench Yu.S. Formation and development of agricultural engineering higher educational institutions in Russia. Moscow: VIM. 2020. 62 (In Russian). EDN: MEUUBM.
2. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 25. №4. 14-25 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
3. Chernoiivanov V.I. To the 100th anniversary of Aleksandr Ivanovich Selivanov. Proceedings of GOSNITI. 2008. Vol. 102. 1-12 (In Russian).
4. Izmaylov A.Yu. VIM: history of formation and development. History of science and engineering. 2019. №12. 3-10 (In Russian). EDN: TLBZCP.
5. Kut'kov G.M., Yerokhin M.N., Didmanidze O.N., et al. Vasily N. Boltinskiy – academician of VASKHNIL (The USSR Academy of Agricultural Sciences). Vestnik of Federal state educational establishment of higher professional education "Moscow state agroengineering university named after V.P. Goryachkin". 2019. №1(89). 66-72 (In Russian). EDN:YXZTVZ.
6. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., et al. Determining the indicators of man-made impact of the technological set of machines used for harvesting vegetable crops. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 25. №2. 15-18 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-15-18.
7. Chernoiivanov V.I., Lyalyakin V.P. Organization and technology of restoration of machine parts. Moscow: VIM. 2022. 284 (In Russian).
8. Chernoiivanov V.I., Lyalyakin V.P. History of the GOSNITI establishment. Machinery technical service. 2020. Vol. 58. №4(141). 165-175 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-4-165-175.
9. Erokhin M.N., Apatenko A.S. Lifetime of creativity. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 25. №5. 84-88 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-84-88.
10. Chernoiivanov V.I., Lyalyakin V.P. Aleksandr I. Selivanov – founder of the aging theory of machines. Machinery technical service. 2023. Vol. 61. №4(153). 109-115 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-109-115.
11. Tsench Yu.S. The system of continuing education at

*the Federal scientific agroengineering center VIM. Agricultural machinery and technologies. 2021. Vol. 15. N4. 11-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-11-13.*

12. Shepvalova O.V., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., et al. High-efficiency photovoltaic equipment for agriculture power supply. *Agriculture. 2023. Vol. 13. N6. 1234. DOI: 10.3390/agriculture13061234.*

#### **Заявленный вклад соавторов**

*Ерохин М.Н. – научное руководство, сбор информации, анализ литературных источников, разработка цели исследования; Скороходов Д.М. – сбор информации, анализ данных, доработка рукописи статьи, формирование выводов.*

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

*Erokhin M.N. – scientific guidance, information collection, analysis of literary sources, development of research aim.*

*Skorokhodov D.M. – collection of information, data analysis, finalization of the manuscript, conclusions.*

All the authors had read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 11.12.2023**

**Статья принята к публикации 22.02.2024**



300-летию Российской академии наук посвящается

## Истоки развития агроинженерной науки в России



<sup>1</sup>Наталья Леонидовна Зайцева, кандидат исторических наук, доцент,  
директор Мемориального музея-квартиры К.А. Тимирязева, e-mail: nataliza008@mail.ru;

<sup>2</sup>Николай Васильевич Алдошин, доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник;

<sup>1</sup>Наталья Юрьевна Рябова, заведующий Музеем земледельческой механики имени В.П. Горячкина

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Статья посвящена изучению новых материалов об истоках развития агроинженерной науки в России, хранящихся в фондах Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. (Цель исследования) Проанализировать развитие агроинженерной науки в России в начальные периоды ее становления. (Материалы и методы) Отметили, что вновь открытые документы более полно освещают ключевую роль В.П. Горячкина в создании факультета земледельческой механики в Сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева, в строительстве машиноиспытательной станции, в формировании Курсов усовершенствования преподавателей в области сельскохозяйственного машиностроения. Изучили материалы комиссии под председательством профессора В.П. Бушинского, созданной для составления проектов и смет по постройке Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства в 1930 году (ныне Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина в составе РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева). Ввели в научный оборот документы, касающиеся открытия Всесоюзного института сельскохозяйственного машиностроения в 1928 году, в частности, стенограмму доклада В.П. Горячкина на собрании Института сельскохозяйственной механики, переименованного в ВИСХОМ 25 ноября 1927 года. (Результаты и обсуждение) Показали различные формы педагогической работы, появившиеся в результате декрета Совета Народных Комиссаров РСФСР «О сельскохозяйственном машиностроении» от 1 апреля 1921 года. (Выводы) К началу 1930-х годов XX века в СССР В.П. Горячкин, выдающийся ученый и организатор науки и образования, заложил основы отечественного сельскохозяйственного машиностроения; впервые выдвинул научные принципы проектирования, расчета и конструирования сельскохозяйственных машин и орудий; разработал методологию испытаний; создал ряд уникальных приборов и аппаратов.

**Ключевые слова:** земледельческая механика, машиноиспытательная станция, механизация сельского хозяйства, Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной механики, Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения, Институт механизации сельского хозяйства.

**Для цитирования:** Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В., Рябова Н.Ю. Истоки развития агроинженерной науки в России // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 1. С. 121-129. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-121-129. EDN: NJGEBW.

Analytical article

Dedicated to the 300th anniversary of the Russian academy of sciences

## THE ORIGINS OF THE AGRICULTURAL ENGINEERING SCIENCE IN RUSSIA

<sup>1</sup>Natalya L. Zaitseva, Ph.D.(Eng.), associate professor, Director

of the Memorial Museum-Apartment K.A. Timiryazev;

<sup>2</sup>Nikolay V. Aldoshin, Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher;

<sup>1</sup>Natalya Yu. Ryabova, Head of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkin

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – MSHA named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper is devoted to the study of new materials on the origins of the development of agroengineering science in Russia, stored in the collections of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkin RGAU – MSHA named after K.A. Timiryazev. (Research purpose) The research purpose is analyzing the development of agroengineering science in Russia in the initial periods of its formation. (Materials and methods) It was noted that the newly opened documents more fully cover the key role of V.P. Goryachkin in the creation of the Faculty of Agricultural Mechanics at the Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, in the construction of a machine testing station, in the formation of advanced training courses for teachers in the field of agricultural engineering. We studied the materials of the commission chaired by Professor V.P. Bushinsky, created to draw up projects and estimates for the construction of the Moscow Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture in 1930 (now the Institute of Mechanics and Power Engineering named after V.P. Goryachkin as part of the RGAU – MSHA named after K.A. Timiryazev). Documents relating to the opening of the All-Union Institute of Agricultural Engineering in 1928 were put into scientific circulation, in particular, the transcript of V.P. Goryachkin's report at the meeting of the Institute of Agricultural Mechanics, renamed VISKHOM, on November 25, 1927. (Results and discussion) They showed various forms of pedagogical work that appeared as a result of the decree of the Council of People's Commissars of the RSFSR "On agricultural engineering" dated April 1, 2021. (Conclusions) By the beginning of the 1930s in the USSR, V.P. Goryachkin, an outstanding scientist and organizer of science and education, laid the foundations of domestic agricultural engineering; for the first time put forward scientific principles for the design, calculation and construction of agricultural machinery and tools; developed a test methodology; created a number of unique devices and apparatus.

**Keywords:** agricultural mechanics, machine testing station, agricultural mechanization, All-Union Scientific Research Institute of Agricultural Mechanics, All-Union Institute of Agricultural Engineering, Institute of Agricultural Mechanization.

**For citation:** Zaitseva N.L., Aldoshin N.V., Ryabova N.Yu. The origins of the agricultural engineering science in Russia. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. N1. 121-129 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-121-129. EDN: NJGEBW.

Истоки развития агроинженерной науки в России неразрывно связаны с именем академика В.П. Горячкина (1868-1935 гг.), заложившего основы теории, методологии и практики дисциплины «Земледельческая механика». Вся жизнь Василия Прохоровича оказалась неразрывно связанной с РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, где он проработал без малого сорок лет. Недавно в Музее земледельческой механики имени В.П. Горячкина были найдены материалы, раскрывающие неизвестные ранее страницы жизни и деятельности выдающегося ученого.

В 1896 г., поступив на работу на кафедру «Почвоведение и общее земледелие» Московского сельскохозяйственного института (такое название вуз носил с 1894 по 1917 г.) для чтения курсов «Учение о сельскохозяйственных машинах» и «Учение о дви-

гателях», В.П. Горячкин уже через пять лет, в 1901 г., создает поистине новаторскую кафедру «Земледельческая механика», носившую в дальнейшем разные названия: «Сельскохозяйственные машины и орудия», «Сельскохозяйственная механика», «Сельскохозяйственное машиноведение», в настоящее время – «Сельскохозяйственные машины» [1].

Все лучшее в своей научно-педагогической деятельности Горячкин воспринял от своих учителей во время учебы на физико-математическом факультете Императорского Московского университета (ныне – МГУ имени М.В. Ломоносова) и на инженерно-механическом отделении Императорского Московского технического училища (ныне – МГТУ имени Н.Э. Баумана) – профессоров Н.Е. Жуковского и Ф.Е. Орлова. Например, они устроили в университете кабинет практической меха-

ники, где собрали коллекцию из 480 моделей всевозможных устройств. Там были, в частности, собранные Жуковским воздушные змеи и летающие бабочки, приводимые в движение закрученной резиной. Когда профессор на занятиях показывал возможности различных механизмов, эффект был потрясающим. Кабинет моделей механизмов университета спустя несколько десятилетий, на рубеже 1920-1930-х гг., курировал один из наиболее известных учеников Горячкина, академик И.И. Артоболевский [2].

В.П. Горячкин потом и сам собрал коллекцию из 87 моделей различных сельскохозяйственных орудий своего времени, и сегодня примерно половина ее находится в Музее сельскохозяйственной механики имени В.П. Горячкина.

**Цель исследования** – проанализировать развитие агроинженерной науки в России в начальные периоды ее становления.

**Материалы и методы.** Менее известна роль в судьбе основателя сельскохозяйственной механики еще одного наставника – профессора А.К. Эшлимана, преподававшего в 1870-1893 гг. одновременно в двух ведущих вузах страны – Петровской сельскохозяйственной и лесной академии и ИМТУ [3].

В училище Эшлиман читал небольшой, но содержательный курс о расчете конных приводов, работе живых двигателей и сельскохозяйственных машин, живо заинтересовавший молодого студента [4].

А.К. Эшлиман был не только прекрасным преподавателем, но и обаятельным человеком, В.П. Горячкин потом тепло вспоминал о нем: «Благодаря чрезвычайно внимательному отношению к исполнению своих обязанностей и мягкости характера, А.К. Эшлиман пользовался любовью и уважением всех» [5].

Практическая подготовка будущих специалистов в области сельскохозяйственного машиностроения в академии с самого ее основания в 1865 г. вызвала постоянные нарекания, хотя в докладе Комитета Министерства государственных имуществ по подготовке вуза к открытию особо отмечалось, что «развитие агрономических знаний и административных действий правительства по сельскому хозяйству увеличивают нужду в специалистах по разным отраслям технических производств» [6].

Спустя семь лет А.С. Ермолов, будущий глава Министерства земледелия и государственных имуществ продолжал с грустью констатировать: «Что касается механики, то большая часть сельскохозяйственных орудий знакома студентам лишь по описаниям; только два или три раза в год, обык-

новенно перед самым экзаменом, они отправляются в Сельскохозяйственный музей и там, в течении нескольких часов, проходят практически всю сельскохозяйственную механику... Я не говорю уже про умение пахать; пахать ни один из них, вероятно, даже и не пробовал. Практические занятия там (в академии – примечание авторов) никогда не были обязательными для слушателей и потому шли кое-как» [7].

А.К. Эшлиман за почти четверть века работы в Петровской земледельческой и лесной академии пытался решить важнейшую проблему учебного процесса подготовки инженеров – соединение теории с практикой. Он не только читал лекции по устройству, эксплуатации и ремонту сельскохозяйственных машин, но и знакомил студентов с непосредственной работой машин на ферме и опытном поле академии. На летней практике его ученики, в частности, занимались разборкой и сборкой сельскохозяйственных машин и впервые в России стали проводить полевые испытания сельскохозяйственной техники [8].

Вся эта работа согласовывалась с выдающимся агрономом, заведующим кафедрой «Земледелие», профессором И.А. Стебутом – председателем Комитета сельскохозяйственной консультации Императорского Московского общества сельского хозяйства (МОСХ).

МОСХ, учрежденное в 1818 г., провозгласило своей целью развитие сельского хозяйства на научной основе. Одно из его четырех отделений, как тогда говорили, «по части строений и машин», взяло в 1820 г. в бессрочную аренду 228 десятин земли на Бутырском хуторе (ныне парк имени Н.И. Гончарова) и 12 сентября 1892 г. провело там первую выставку сельскохозяйственных орудий и машин с их экспертизой. Именно МОСХ оказало огромную поддержку А.К. Эшлиману в проведении практических занятий со студентами и испытаний сельскохозяйственных машин.

Общество издавало «Земледельческий журнал», называвшийся в разное время «Журналом сельского хозяйства и овцеводства», «Журналом сельского хозяйства», «Сельским хозяйством», «Русским сельским хозяйством», «Вестником сельского хозяйства» и пропагандировавший новые методы ведения сельского хозяйства. В.П. Горячкин, кстати, был его постоянным автором.

Убежденные сторонники производственного обучения – И.А. Стебут и А.К. Эшлиман считали, что соединение высшей школы и опытных станций является одним из главных условий успеха



сельскохозяйственного образования, и в 1871 г. предложили создать особую станцию по испытанию сельскохозяйственной техники. Для решения этого вопроса Совет Петровской земледельческой и лесной академии создал комиссию, представившую в мае 1873 г. свой доклад, но до практических действий дело не дошло [9].

В.П. Горячкин, начав работать в МСХИ, смог реализовать давнюю мечту своего учителя профессора А.К. Эшлимана о постройке Машиноиспытательной станции (МИС). Став с первого дня работы в вузе экспертом выставок сельскохозяйственных орудий и машин на Бутырском хуторе, Горячкин в 1903 г. был назначен главным экспертом, и за участие в работах по испытанию машин был награжден Серебряной медалью МОСХа (эта награда сегодня хранится в Музее земледельческой механики имени В.П. Горячкина). Но испытания на Бутырском хуторе проводились один раз в два-три года и носили скорее рекламный характер. А Горячкин интересовал прежде всего другие цели: научные (создание теории и методов расчета сельскохозяйственных машин и орудий), практические (устранение технических проблем по требованиям потребителей) и педагогические (подготовка агроинженерных кадров). Будучи заведующим кафедрой «Земледельческая механика», В.П. Горячкин задумывал МИС как составную часть образовательно-педагогического процесса, тем более, что с 1905 г. выпускники сельскохозяйственно-инженерного отделения МСХИ получали диплом не «агронома-техника», а «инженера-агронома», а в 1913 г. сельскохозяйственно-инженерное отделение вуза было преобразовано в инженерное, что, несомненно, повышало престиж получаемой специальности.

Борьба за воплощение в жизнь своей идеи о постройке Машиноиспытательной станции продолжалась у В.П. Горячкина шесть лет. В Главном управлении землеустройства и земледелия Министерства земледелия и государственных имуществ Горячкин нашел полное понимание, но Министерство финансов задерживало выделение необходимых средств. Понимая, что финансирование его проекта затягивается на неопределенный срок, В.П. Горячкин поднял все свои связи в столице, решив для начала искать помощи у своих бывших учеников. Дело в том, что в 1907 г. в Министерстве земледелия и государственных имуществ с целью создания научных и практических основ механизации сельского хозяйства была образована новая структура – Бюро по сельскохозяйственной механике [10].

Ее руководителем стал агроном по образованию

выпускник МСХИ Д.Д. Арцыбашев, прослушавший в свое время курс земледельческой механики у В.П. Горячкина. Работал в нем еще один ближайший ученик Горячкина, его бывший помощник по испытаниям сельскохозяйственной техники на Бутырском хуторе В.Ю. Ган. Естественно, что специалисты, хорошо понимавшие необходимость развития машиноиспытательных станций в России, горячо поддержали инициативу своего учителя.

Понимание В.П. Горячкин нашел и в лице тогдашнего директора МСХИ профессора И.А. Иверонова. Московский сельскохозяйственный институт в начале XX в. представлял собой непрерывающуюся стройку, а Иверонова даже стали называть «директором-строителем», чей выдающийся административный талант во многом способствовал устройству инженерного факультета. Именно руководителем вуза активно содействовал созданию в МСХИ первой в России Селекционной станции Д.Л. Рудзинского, Льняной станции И.С. Шулова, Фитопатологической станции С.И. Ростовцева и Станции питания растений Д.Н. Прянишникова.

В.П. Горячкин в ожидании создания Машиноиспытательной станции уже с 1906 г. постепенно готовил почву для ее работы. В деревянном машинном сарае постройки 1887 г. была создана Лаборатория кафедры «Земледельческая механика», где хранились основные типы сельскохозяйственных машин – плуги, сеялки, молотилки, жатвенные машины, сенной пресс, культиватор, шредер, зерносушилка и льномялка (рис. 1).

Парк постоянно пополнялся новыми плугами, боронами, культиваторами, орудиями для междурядной обработки, пропашниками, почвоуглубителями, кочкорезами, луговыми боронами, веялками и молотилками, различными приборами и аппаратурой. Испытания и исследования машин, проводимые в Лаборатории, отличались глубокой теоретической проработкой не отдельного элемента машины, а всего выполняемого процесса. Для оценки изменяемых величин составлялись индивидуальные методики, создавалась специальная аппаратура, как, например, разработанные В.П. Горячкиным плотномер для определения объемного коэффициента смятия и предела плотности почвы, профилометр, динамометры и динамографы силовых узлов машин, тугости связывания снопов, триер, станок для сверления ячеек и многое другое.

Новые измерительные приборы для испытаний сельскохозяйственной техники и различные механизмы дорабатывали столяр И.С. Калашников и слесарь И.Ф. Ярославцев.





Рис. 1. Панорама опытного поля МСХИ в 1912 г. Вид на машинный сарай кафедры «Земледельческая механика» с вышки Метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона. Публикуется впервые

Fig. 1. Panorama of the experimental field of the MAI in 1912 View of the machine shed of the Agricultural Mechanics Department from the tower of the V.A. Mikhelson Meteorological Observatory. Published for the first time

Всего В.П. Горячкин сконструировал около тридцати новых измерительных устройств. В 1909 г. В.П. Горячкин мог уже уверенно констатировать, что «испытание сельскохозяйственных машин при институте, несмотря на отсутствие официальной станции и при недостатке средств, развивается с каждым годом все более и более. Так, изобретатель сноповязалки из Харькова, где имеется станция при Технологическом институте, привозил свою машину четыре года подряд, завод Столля (Воронеж) присылает второй год свои плуги для исправления, завод Феникс в Риге предлагает для экспертизы все свои изделия» [9].

По инициативе сотрудников Бюро по сельскохозяйственной механике 1 января 1912 г. был принят закон «О некоторых мероприятиях по устройству и содержанию сельскохозяйственных опытных станций», на основании которого было решено построить машиноиспытательные станции в шести регионах России, в том числе в Москве.

Проект здания МИСа, задуманный В.П. Горячкиным, с большой тщательностью без малейших изменений был реализован профессором П.С. Страховым, возглавлявшим кафедру «Сельскохозяйственная архитектура» МСХИ и ставшим архитектором еще нескольких зданий в вузе, например, 28-го учебного корпуса и Метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона. Хотя по образованию Страхов был инженером-механиком, окончившим в 1892 г. ИМТУ, он обладал при этом большим художественным вкусом. Официальное открытие МИСа произошло 1 января 1914 г. и практически сразу станция стала служить еще и целям

просвещения всех интересующихся и занимающихся механизацией земледелия (рис. 2). Инициативный, и, как сейчас бы сказали, креативный В.П. Горячкин при поддержке Бюро по сельскохозяйственной механике, организовал Курсы по подготовке инструкторов по сельскохозяйственной механике, действовавшие с 1912 по 1920 г. По мнению Горячкина, в России практикующим специалистам сельского хозяйства невольно приходилось быть мастерами на все руки – слабо развитая промышленность, большая удаленность сельских поселений от городов вынуждали самих работников нести заботы по ремонту и уходу за машинами.

Из числа окончивших Курсы можно назвать некоторых учеников В.П. Горячкина, ставших впоследствии крупными специалистами в области сельскохозяйственного машиностроения, например, Д.В. Куликова, С.М. Росмана (в дальнейшем – сотрудника ВИСХОМа), М.Ф. Герасимова (в дальнейшем – старшего инструктора Департамента земледелия Министерства земледелия и государственных имуществ), И.А. Ирбе (в дальнейшем – сотрудника Прибалтийской МИС), Г.Г. Берниса (в дальнейшем – профессора), Д.Д. Власова (в дальнейшем – составителя Справочника по сельскохозяйственным машинам) [11].



Рис. 2. Профессор В.П. Горячкин, заведующий кафедрой «Земледельческая механика» Московского сельскохозяйственного института в 1913 г.

Fig. 2. Professor V.P. Goryachkin, Head of the Department of Agricultural Mechanics at the Moscow Agricultural Institute in 1913

Машиноиспытательная станция стала опытным полигоном кафедры «Земледельческая механика» на двадцать лет. К 1915 г. студенты инженерного отделения МСХИ создали даже свою орга-

низацию – «Инженерное бюро». Прежде малочисленное инженерное отделение быстро разрасталось, если в 1901 г. на нем учились всего лишь 8 человек, то в 1915 г. уже 329. Студенты, издававшие свой журнал «Анофелес», даже сочинили стишок, посвященный открытию МИСа (сохранена орфография того времени):

«Профилограф абсурдные кривья чертит, а двигатель порожня машины вертит» [9].

В 1915 г. на МИСе помимо испытаний уборочных, почвообрабатывающих, посевных, зерноочистительных машин и молотилок появилось новое направление – тракторное, которое возглавил выпускник ИМТУ 1906 г., специалист по двигателям внутреннего сгорания ученик профессора Н.Е. Жуковского А.Н. Судаков.

В 1919 г., миновав пятидесятилетний рубеж своей жизни, В.П. Горячкин написал знаковый для себя труд «Земледельческая механика», совмещая занятие наукой и работу в 1919-1922 гг. на посту ректора Петровской сельскохозяйственной академии (такое название носил вуз в 1917-1923 гг.). В 1923 г. Горячкин издает учебник для студентов сельскохозяйственных факультетов под названием «Земледельческие машины и орудия», долгое время служивший основным пособием для всех студентов – как инженеров, так и агрономов.

**Результаты и обсуждение.** Исторической вехой в деле инженерного сельскохозяйственного образования служит дата 1 апреля 1921 г., когда был издан декрет Совета Народных Комиссаров РСФСР «О сельскохозяйственном машиностроении», где сельскохозяйственное машиностроение признавалось делом «чрезвычайной государственной важности», поручалось ускорить подготовку кадров и открыть институты и факультеты по сельскохозяйственному машиностроению [12].

В стране шел активный поиск новых форм обучения студентов, создавались вузы, сливались и разделялись факультеты, появлялись различные формы педагогической работы. Не остался в стороне от новых веяний и В.П. Горячкин, создавший на базе Машиноиспытательной станции Кружок по земледельческой механике, в котором занимались на протяжении всех лет его существования (1922-1928 гг.) почти 80% обучающихся на отделении сельскохозяйственного машиностроения.

Студенты делали научные доклады, им читали дополнительные лекции приглашенные специалисты. Например, академик В.Р. Вильямс прочитал четыре доклада на тему «Требования агрономии и почвообрабатывающие орудия», инженер

Н.Н. Ульрих познакомил с новостями сельскохозяйственного машиностроения из Германии, а главный инженер строящегося тогда завода «Ростсельмаш» В.Ю. Ган рассказал о своей работе. Активистов возили на экскурсии по самым разным регионам страны. Всего за шесть лет существования Кружка по земледельческой механике было проведено около 60 экскурсий, с докладами выступило не менее 100 человек, а всего в его работе приняли участие более 1500 студентов. Именно из активистов-студентов выдвигались кадры для научной работы, Кружок давал рекомендации лицам, желающим идти в производство, просматривались отчеты по производственной практике [13].

В.П. Горячкин всегда проявлял большую активность и настойчивость в привлечении к преподавательской и научной работе одаренных студентов, способных внести свой вклад в науку. Достаточно сказать, что на машиноиспытательной станции начали свой трудовой путь пять академиков: В.А. Желиговский, В.П. Селезнёв, И.И. Артоболовский, В.Н. Болтинский и Н.Д. Лучинский [14].

Всего на МИСе в 1923-1930 гг. было испытано 113 плугов, 9 борон и культиваторов, 20 сеялок, 33 уборочные машины, 22 молотилки, столько же конных приводов, 44 сортировки, веялки и триеры, 6 машин по переработке кормов, 14 разных ручных орудий, 25 тракторов и 40 тракторных плугов [15]. В 1918 г. В.П. Горячкин по просьбе Н.Е. Жуковского выделил ему вентилятор, снятый с сельскохозяйственной техники, для создания аэродинамической трубы, положившему начало знаменитому ЦАГИ (ныне Центральный аэрогидродинамический институт имени Н.Е. Жуковского). В связи с изучением вентиляторов, применяемых в разнообразных сельскохозяйственных машинах, установилась связь с НАМИ (Научно-автомоторный институт, ныне Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП «НАМИ»).

В 1920-е г. МИС активно сотрудничала с различными лабораториями Сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева (ТСХА – название вуза с 1923 по 2015 г.): сопротивления материалов, технологии металлов и дерева, семеноведения и кабинетом прикладной механики.

Постепенно у В.П. Горячкина созрела мысль о создании научно-исследовательского института по механизации сельского хозяйства. Не дожидаясь окончательного юридического утверждения нового НИИ, Горячкин, получив необходимое финансирование, приступил к развертыванию научно-исследовательской работы на базе машиноиспы-

тательной станции ТСХА. Рядом с профессором был его ученик и давний друг Д.Д. Арцыбашев. 25 ноября 1927 г. на собрании будущего НИИ В.П. Горячкин, выступая с программной речью, заявил, что в институте должны быть развиты и представлены в одинаковой степени все вопросы сельскохозяйственного машиностроения: хозяйственно-экономические, производственные, конструкторские и исследовательские. В то время в штате МИСа числилось семь человек, но принимали деятельное участие не менее 50 ученых-специалистов различных отраслей знаний. Как подчеркивал докладчик, «коллектив сотрудников станции уже сработался, сговорился в течении ряда лет» [16].

Постановлением Совета Труда и Оборона и Совнаркома СССР от 18 декабря 1928 г. № 283 на базе машиноиспытательной станции ТСХА был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной механики, реорганизованный в 1931 г. во Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ), чей первый штат из 83 человек состоял практически только из профессорско-преподавательского состава ТСХА. В конце марта 1931 г. МИС была преобразована в целый ряд лабораторий, а ремонтная мастерская передана на кафедру «Ремонт машин» МИМЭСХа. Уже в наши непростые рыночные времена в 2016 г. ВИСХОМ юридически прекратил свое существование.

В 1930 г. в СССР был создан еще один НИИ, сменивший в начале своего существования несколько названий: Всесоюзный институт механизации обобществленного сельского хозяйства, НИИ механизации сельского хозяйства, Институт механизации сельского хозяйства, ныне – ФНАЦ ВИМ. Не дублировали ли друг друга два НИИ в области сельскохозяйственного машиностроения?

Ответ кроется в постановлении Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина от 31 января 1932 г.: «на ВИМ возлагалась обязанность дать теоретический и опытный ответ на все те вопросы, которые возникают внутри специализированного сельского хозяйства в области механизации и электрификации. Обязанность же ВИСХОМа – все то, что касается организации производства на заводах сельскохозяйственного машиностроения» [17].

В.П. Горячкин разработал план научных исследований ВИМа, его структуру, а 11 декабря 1932 г. был назначен научным консультантом института. Именно в ВИМе был создан первый диссертационный Совет в стране по защите кандидатских и

докторских диссертаций по вопросам, связанным с механизацией сельскохозяйственного производства, который и возглавил Горячкин.

В 1920-е гг. ВКП(б) выдвинула лозунг: «Кадры, владеющие техникой, решают все» и В.П. Горячкин загорелся идеей преобразования отделения сельскохозяйственного машиностроения уже в самостоятельный факультет земледельческой механики ТСХА. Он обращался за поддержкой своей инициативы в самые разнообразные структуры, например, 2 августа 1927 г. в Президиум Центрального комитета Всероссийского союза рабочих металлистов, а 1 октября того же года – в Бюро по сельскохозяйственному образованию при Наркомате земледелия РСФСР и Наркомземе СССР, и везде получил положительный ответ [18].

Согласились с этой идеей и ведущие заводы страны («Сельмашстрой» г. Ростова-на-Дону, правление Треста заводов сельскохозяйственного машиностроения Центрального района, Люберецкий завод сельскохозяйственных машин имени Ухтомского). Смысл писем-обращений, направленных ими руководству ТСХА, был единодушен – поскольку школа земледельческой механики, созданная под руководством профессора Горячкина, состоялась и получила признание не только в СССР, но и за границей, то стало возможным и даже необходимым преобразовать отделение сельскохозяйственного машиностроения в самостоятельный факультет.

В 1928 г. в ТСХА появился тринадцатый факультет – факультет земледельческой механики, вскоре переименованный в факультет сельскохозяйственного машиностроения. На его основе были открыты Курсы усовершенствования преподавателей в области сельскохозяйственного машиностроения, на которых обучались, например, С.В. Полетаев (профессор ВИСХОМа и МИМЭСХа), М.М. Якуб (профессор ТСХА), М.И. Унсков (конструктор Подольского машиностроительного завода), А.П. Крамаренко (профессор Киевского сельскохозяйственного института) и А.А. Барановский (преподаватель Воронежского института).

Но В.П. Горячкин на этом не остановился и вместе с группой единомышленников обратился в Наркомзем СССР с ходатайством организовать отдельный Институт индустриализации и механизации сельского хозяйства, была даже назначена комиссия для составления проектов и смет по постройке нового института под председательством профессора В.П. Бушинского (1885-1960 гг.).





Рис. 3. Практические занятия студентов кафедры «Сельскохозяйственные машины» МИМЭСХа в 1931 г. Публикуется впервые  
Fig. 3. Practical classes of students of the department "Agricultural machines" of the Moscow Agricultural Academy in 1931 Published for the first time

Бушинский, выпускник МСХИ 1911 г., в это время был крупным авторитетом в области агрономии, заведующим кафедрой «Почвоведение» Московского лесотехнического института, профессором кафедры «Почвоведение» ТСХА, директором Всесоюзного института агропочвоведения, и, что немало важно, сотрудником Наркомпроса РСФСР. 1 сентября 1930 г. состоялось открытие Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства (ныне Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина в составе РГАУ–МСХА), где Горячкин возглавил кафедру «Сельскохозяйственные машины» и руководил ею до 1934 г. (рис. 3).

**Выводы.** К началу 1930-х гг. XX в. в СССР В.П. Горячкин, выдающийся ученый и организатор науки и образования, заложил основы отечественного сельскохозяйственного машиностроения; впервые выдвинул научные принципы проектирования, расчета и конструирования сельскохозяйственных машин и орудий; разработал методологию испытаний; создал ряд уникальных приборов и аппаратов.

Однако прежде всего В.П. Горячкин был преподавателем, его всегда окружала студенческая среда, он создал свою школу учеников, внося огромный вклад в создание первых агроинженерных научно-исследовательских, образовательных и испытательных учреждений.

### Библиографический список

1. Материалы о создании факультета земледельческой механики ТСХА (1926–1928) // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина. Папка N51. С. 4.
2. Ерохин М.Н., Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В. Василий

Прохорович Горячкин: страницы жизни. М.: Росинформагротех. 2020. 279 с. EDN: VUTDSM.

3. Зайцева Н.Л., Рябова Н.Ю. Машино-испытательная станция как база практической подготовки агроинженеров // Агроинженерия. 2023. N5. С. 78–84. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-78-83>.

4. Криль Б.А. Биография академика В.П. Горячкина // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина. 1937. Папка N53.

5. Баутин В.М., Казарезов В.В. Золотая летопись Тимирязевки. Т. 2: Петровская (Тимирязевская) академия: становление (1873–1894). Т. II. Ч. I. М.: Росинформагротех. 2006. 420 с. EDN: QKXLNL.

6. Сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева / под общ. ред. В.С. Немчинова. М.: Сельхозгиз. 1946. 430 с.

7. Ермолов А.С. Высшее сельскохозяйственное образование в его отношении к сельскохозяйственному делу в России. СПб.: типография К. Сорванова и Комп. 1872. 60 с.

8. Алдошин Н.В., Зайцева Н.Л., Рябова Н.Ю. К 120-летию кафедры «Сельскохозяйственные машины» РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (1901–2021). М.: ООО «Сам полиграфист». 2021. 154 с.

9. Материалы об истории РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина. Папка N51. С. 18.

10. Ценч Ю.С. Становление и развитие научно-технического и кадрового обеспечения агропромышленного комплекса России. М.: ВИМ. 2021. 156 с. EDN: JJVOPC.

11. Клёнин Н.И. История кафедры «Уборочные машины» // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина. Папка N1.

12. О сельскохозяйственном машиностроении. Декрет Совета Народных Комиссаров от 1 апреля 1921 года // Собрание Узаконений. 1921. N1.

13. Милова Н.В. Материалы о работе кружка по земледельческой механике // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина. Папка N 56.

14. Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В., Рябова Н.Ю. Страницы истории агроинженерного образования России в РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева // Известия ТСХА. 2021. N4. С. 149–169. DOI: 10.26897/0021-342X-2021-4-149-169.

15. Отчет о работе Машиноиспытательной станции за 1923–1931 годы // Материалы Музея имени В.П. Горячкина. Папка N56. С. 63.

16. Стенограмма доклада В.П. Горячкина на собрании Института сельскохозяйственной механики 25 ноября 1927 года // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горячкина. Папка N51. С. 40.

17. Анискин В.И. Основные итоги работы и перспективы развития ВИМа // ВИМ: история механизации (1930–2005). М.: ВИМ. 2005. С. 5–60. EDN: UKOYPV.



18. *Материалы о создании Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства (1928-1930) // Материалы Музея земледельческой механики имени В.П. Горькина. Папка N54. С. 6-7.*

### References

1. *Materials on the creation of the Faculty of Agricultural Mechanics of the TSHA (1926-1928). Materials of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. Folder N51. 4 (In Russian).*

2. *Erokhin M.N., Zaitseva N.L., Aldoshin N.V. Vasily Prokhorovich Goryachkin: pages of life. M.: Rosinformagrotekh. 2020. 279 (In Russian). EDN: VUTDSM.*

3. *Zaitseva N.L., Ryabova N.Yu. Machine testing station as a practical training base for agricultural engineers. Agricultural Engineering. 2023. N5. 78-84 (In Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-78-83>.*

4. *Krill B.A. Biography of Academician V.P. Goryachkina. Materials of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. 1937. Folder N53. (In Russian).*

5. *Bautin V.M., Kazarezov V.V. Golden Chronicle of Timiryazevka. Vol. 2: Petrovskaya (Timiryazevskaya) Academy: formation (1873-1894). Vol. II. Part I. M.: Rosinformagrotekh. 2006. 420 (In Russian). EDN: QKXLNL.*

6. *Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev / Gen. ed. by V.S. Nemchinov. M.: Selkhozgiz. 1946. 430 (In Russian).*

7. *Ermolov A.S. Higher agricultural education in its relationship to agricultural business in Russia. St. Petersburg: printing house of K. Sorvanov and Comp. 1872. 60 (In Russian).*

8. *Aldoshin N.V., Zaitseva N.L., Ryabova N.Yu. To the 120th anniversary of the Department of Agricultural Machines of the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev (1901-2021). M.: LLC "Sam Polygraphist". 2021. 154 (In Russian).*

9. *Materials about the history of RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev. Materials of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. Folder N51. 18 (In Russian).*

10. *Tsench Yu.S. Formation and development of scientific, technical and personnel support for the agro-industrial complex of Russia. M.: VIM. 2021. 156 (In Russian). EDN: JJVOPC.*

11. *Klenin N.I. History of the Department of Harvesting Machines. Materials of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. Folder N1. (In Russian).*

12. *Agricultural engineering. Decree of the Council of People's Commissars of April 1, 1921. Collection of Legislation. 1921. N1. (In Russian).*

13. *Milova N.V. Materials about the work of the circle on agricultural mechanics. Materials of the Museum of*

*Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. Folder N56. (In Russian).*

14. *Zaitseva N.L., Aldoshin N.V., Ryabova N.Yu. Development stages of domestic agroengineering education in Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 2021. N4. 149-169 (In Russian). DOI: 10.26897/0021-342X-2021-4-149-169.*

15. *Report on the work of the Machine Test station for the years 1923-1931. Materials of the V.P. Goryachkin Museum. Folder N56. 63 (In Russian).*

16. *Transcript of the report by V.P. Goryachkina at the meeting of the Institute of Agricultural Mechanics on November 25, 1927. Materials of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. Folder N51. 40 (In Russian).*

17. *Aniskin V.I. The main results of the work and prospects for the development of VIM. VIM: history of mechanization (1930-2005). M.: VIM. 2005. 5-60 (In Russian). EDN: UKOYPPV.*

18. *Materials on the creation of the Moscow Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture (1928-1930). Materials of the Museum of Agricultural Mechanics named after V.P. Goryachkina. Folder N54. 6-7. (In Russian).*

### Заявленный вклад соавторов

*Зайцева Н.Л. – руководство исследованием, методология, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Алдошин Н.В. – концептуализация, администрирование проекта, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация; Рябова Н.Ю. – формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Contributions of the coauthors

*Zaitseva N.L. – research management, methodology, creation of the final manuscript and its editing; Aldoshin N.V. – conceptualization, project administration, creation of the final manuscript and its editing, visualization; Ryabova N.Yu. – formal analysis, conducting research, creating a draft manuscript.*

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

**Статья поступила в редакцию 15.12.2023**

**Статья принята к публикации 19.02.2024**

**ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ УЧЕНИЯ В.П. ГОРЯЧКИНА В ТРУДАХ  
НАУЧНЫХ ШКОЛ ЮЖНОГО УРАЛА**

*Елена Владимировна Годлевская, кандидат педагогических наук,  
доцент, e-mail: elengodl@ya.ru*



**Челябинский государственный промышленно-гуманитарный техникум  
имени А.В. Яковлева, г. Челябинск, Российская Федерация**

**Реферат.** В статье обобщили и кратко изложили фактический материал, раскрывающий вклад ученых агроинженерной школы Южного Урала в развитие научных идей В.П. Горячкина. Созданный в 1930 г. Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства стал центром развития таких научных направлений, как исследование динамики мобильных сельскохозяйственных агрегатов, развитие теории двигателей, совершенствование конструкции тракторов, разработка дифференциального способа обмолота зерновых культур, интенсификация и автоматизация процессов сепарации зерна, создание научных основ технического сервиса и теории восстановления сельскохозяйственных машин. (Цель исследования) Систематизировать исторические и научные материалы в области становления и развития агроинженерных научных школ Южного Урала; показать преемственность учения В.П. Горячкина в трудах рассмотренных научных школ. (Материалы и методы) Установили, что на теоретические и практические результаты научных разработок школы А.И. Любимова большую роль оказали многочисленные полевые испытания в колхозах и совхозах Южного Урала, а также применение для вычислений системы автоматизированного проектирования. Описали влияние развития моделей гусеничных тракторов Челябинского тракторного завода на научные исследования Е.М. Харитончика, И.Е. Ульмана. Выделили связи между отраслевыми научными институтами и Челябинским институтом механизации и электрификации сельского хозяйства. (Результаты и обсуждение) Провели систематизацию научных достижений профессорско-педагогического состава Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства с 1930 по 2023 год. (Выводы) Ученые научных школ Южного Урала в полной мере использовали все имеющиеся в регионе и за его пределами ресурсы: тесную связь внутри отраслевого научного сообщества (ВИМ, ГОСНИТИ, НАТИ), плотную работу с передовыми производственными и сельскохозяйственными предприятиями для развития агроинженерной науки и образования и внедрения результатов в производство.

**Ключевые слова:** агроинженерная наука, научные школы, опытно-конструкторские работы, математическое описание, автоматизированное проектирование, восстановление деталей сельскохозяйственных машин.

**Для цитирования:** Годлевская Е.В. Преемственность учения В.П. Горячкина в трудах научных школ Южного Урала // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. N1(154). С. 130-136. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-130-136. EDN: NQUQKK.

Review article

**CONTINUITY OF V.P. GORYACHKIN'S TEACHING IN THE WORKS  
OF SCIENTIFIC SCHOOLS OF THE SOUTHERN URALS**

*Elena V. Godlevskaya, Ph.D.(Ped.), associate professor*

*Chelyabinsk State Industrial and Humanitarian College named after A.V. Yakovlev,  
Chelyabinsk, Russian Federation*

**Abstract.** The paper summarizes the factual material revealing the contribution of scientists of the

agroengineering school of the Southern Urals to the development of V.P. Goryachkin's scientific ideas. The Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, established in 1930, became the center for the development of such scientific areas as the study of the dynamics of mobile agricultural units, the development of engine theory, the improvement of tractor design, the development of a differential method for threshing grain crops, the intensification and automation of grain separation processes, the creation of scientific foundations of technical service and the theory of restoration of agricultural machinery. (Research purpose) The research purpose is systematization of historical and scientific materials in the field of development of agroengineering scientific schools of the Southern Urals; showing the continuity of V.P. Goryachkin's teachings in the works of the considered scientific schools. (Materials and methods) Found out that the theoretical and practical results of scientific developments of the Lyubimov school were greatly influenced by numerous field tests in collective farms and state farms of the Southern Urals, as well as the use of computer-aided design systems for computing. The influence of the development of tractors of the Chelyabinsk Tractor Plant on the scientific research of E.M. Kharitonchik, I.E. Ulman was described. The links between branch scientific institutes and the Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture were highlighted. (Results and discussion) We systematized the scientific achievements of the teaching staff of the Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture from 1930 to 2023. (Conclusions) Scientists of scientific schools of the Southern Urals fully used all the resources available in the region and beyond: close communication within the branch scientific community (VIM, GOSNITI, NATI), close work with advanced industrial and agricultural enterprises for the development of agroengineering science and education and the introduction of the results into production.

**Keywords:** agricultural engineering science, scientific schools, development work, mathematical description, computer-aided design, restoration of parts of agricultural machines.

**For citation:** Godlevskaya E.V. Continuity of V.P. Goryachkin's teaching in the works of scientific schools of the Southern Urals. *Machinery technical service*. 2024. Vol. 62. N1. 130-136 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-130-136. EDN: NQUQKK.

Процессы коллективизации и индустриализации, проходившие в стране в 20-30 гг. XX в., коренным образом изменили регион Южного Урала. Челябинская область стала крупным промышленным и аграрным центром с высококоразвитой системой высшего профессионального образования. На становление и развитие агроинженерных научных школ Южного Урала большое влияние оказали следующие факторы: открытие купного предприятия сельскохозяйственного машиностроения – Челябинского тракторного завода им И.В. Сталина (ЧТЗ), направление из центральных регионов страны научных кадров (учеников В.П. Горячкина). Научные традиции горячкинской школы нашли свое продолжение и развитие не только в созданных на Южном Урале научных школах, но и в агроинженерном образовании.

**Цель исследования** – систематизировать исторические и научные материалы в области становления и развития агроинженерных научных школ Южного Урала; показать преемственность учения В.П. Горячкина в трудах рассмотренных научных школ.

**Материалы и методы.** Окончившие Тимирязевскую сельскохозяйственную академию, Москов-

ский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Ленинградский политехнический институт (факультет индустриализации сельского хозяйства) научные работники (Е.И. Харитончик, И.Е. Ульман, Г.Д. Терсков, К.Г. Колганов) приехали в Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИ-МЭСХ), основанный в 1930 г., с целью организации подготовки инженерных кадров для сельского хозяйства [1].

Сферы научных интересов ученых затрагивали различные стороны заложенного В.П. Горячкиным научного обоснования сельскохозяйственного машиностроения.

Теорию трактора развивала научная школа Е.М. Харитончика. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы велись по обоснованию параметров сельскохозяйственных тракторов, их систем и механизмов.

Изучение динамики мобильных сельскохозяйственных агрегатов на примере почвообрабатывающих машин вела научная школа, в состав которой входили такие ученые, как В.И. Виноградов, А.И. Любимов, В.В. Бледных [2].



Таблица 1

Преемственность учения В.П. Горячкина в трудах научных школ В.И. Виноградова, Е.М. Харитончика  
Continuity of V.P. Goryachkin's teaching in the works of scientific schools of V.I. Vinogradov, E.M. Kharitonchik

Table 1

**Научное обоснование сельскохозяйственного машиностроения. В.П. Горячкин Земледельческая механика, 1919 г**

Теория плуга. 1927 г. Теория разрушения почвы. О силе тяги тракторных плугов [3]		Теория ведущего и ведомого колеса применительно к трактору. Основные уравнения движения с учетом моментов инерции при явлениях скольжения или буксования [4]	
Изучение динамики мобильных сельскохозяйственных агрегатов на примере почвообрабатывающих машин		Вопросы теории двигателей, совершенствование конструкции и средств контроля технического состояния тракторов	
Виноградов В.И.	Сопротивление рабочих органов лемешного плуга и методы снижения энергоемкости пахоты, 1969 г.	Харитончик Е.М.	Исследование влияния скорости расширения газа на закономерности газовых процессов в связи с проблемой улучшения динамических качеств автотракторных двигателей, 1937 г.
Любимов А.И.	Динамика широкозахватных агрегатов основной обработки почвы, 1973 г.	Саяпин В.И.	Оценка тяговых качеств гусеничных тракторов при помощи удельных параметров, 1948 г.
Бледных В.В.	Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе математического моделирования технологических процессов, 1989 г.	Башкатов А. Ф.	Исследование вибрации тракторных двигателей типа КДМ-100, 1958 г.
		Злотник М.И.	Разработка основных предпосылок, создание и исследование опытного образца гидромеханической трансмиссии трактора класса 6 т, 1966 г.
Рахимов Р.С.	Повышение эффективности технологического процесса работы противэрозийных почвообрабатывающих машин, 1990 г.	Попов В.Н.	Пути повышения эффективности использования мощности двигателей гусеничных тракторов в сельском хозяйстве, 1974 г.
Рахимов И.Р.	Научное обоснование и разработка адаптивных технологий и технических средств обработки почвы и посева, 2022 г.	Кычев В.Н.	Повышение производительности машинно-тракторных агрегатов на основе эффективного использования установленной мощности двигателей энергонасыщенных тракторов, 1997 г.

Разработку отдельных вопросов теории и расчета сельскохозяйственных машин вели ученые под руководством Г.Д. Терскова (*табл. 1*).

Исследования, направленные на совершенствование конструкции комбайна на основе дифференциального способа обмолота зерновых культур, разрабатывались научной школой под руководством К.Г. Колганова [5].

В.А. Кубышев руководил научной школой по интенсификации и автоматизации процессов сепарации зерна (*табл. 2*). Созданием научных основ технического сервиса и теории восстановления сельскохозяйственных машин занималась научная школа под руководством И.Е. Ульмана (*табл. 3*).

**Результаты и обсуждение.** Научная школа А.И. Любимова, в которую входили В.И. Виноградов и

Таблица 2

Преемственность учения В.П. Горячкина в трудах научных школ К.Г. Колганова, В.А. Кубышева  
Continuity of V.P. Goryachkin's teaching in the works of the scientific schools of K.G. Kolganov, V.A. Kubyshev

Table 2

**Научное обоснование сельскохозяйственного машиностроения. В.П. Горячкин Земледельческая механика, 1919 г**

Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин, 1935 г. [6]		Теория процесса сепарации мелкого зернового вороха на решетках	
Разработка дифференциального способа обмолота зерновых культур. Совершенствование конструкции зернового комбайна		Интенсификация и автоматизация процессов сепарации зерна	
Колганов К.Г.	Выделение биологически ценных семян в процессе обмолота, 1953 г.	Кубышев В.А.	Технологические основы интенсификации процесса сепарации зерна, 1968 г.
Петроград К.В.	Влияние способов подачи хлеба на работу молотильного аппарата при двухфазном обмолоте, 1968 г.	Терсков Г.Д.	Основные закономерности процесса прохождения семян в отверстия решет и ячеек триеров, 1969 г.
Каданцев П.М.	Исследование процесса сепарации зерна из соломы ротационным сепаратором при двухфазном обмолоте, 1968 г.	Панус Ю.В.	Экономическая эффективность механизации послеуборочной обработки зерна (методика расчета), 1964 г.
		Тулькибав М.А.	Технологические основы оптимизации процесса работы зерноочистительных машин 1971 г.
Косилов Н.И.	Интенсификация сепарирования зернового вороха, 1989 г.	Тулькибав М.А.	Разработка методов повышения надежности и эффективности функционирования технологических комплексов производства зерна и кормов, 2006 г.
Лукиных Г.Ф.	Исследование процесса подачи хлебной массы с разравниванием по ширине молотилки при двухфазном обмолоте на подборе валков, 1971 г.		



Таблица 3

Table 3

Преемственность учения В.П. Горячкина в трудах научной школы И.Е. Ульмана  
Continuity of V.P. Goryachkin's teaching in the works of the scientific school of I.E. Ulman

**Научное обоснование сельскохозяйственного машиностроения. В.П. Горячкин Земледельческая механика. 1919 год**

Создание научных основ технического сервиса и теории восстановления сельскохозяйственных машин

Ульман И.Е.	Техника ремонта трактора ЧТЗ «Сталинец-60», 1937 г. Прерывистый анализ как метод изучения влияния износов деталей шатунно-поршневой группы клапанного и распределительного механизма и топливной аппаратуры на работоспособность двигателя, 1943 г. Ремонт и реставрация тракторных деталей, 1946 г. Ремонт тракторов в МТС: организация ремонта и технические условия на ремонт тракторов, 1947 г. Способы предупреждения и устранения неисправностей трактора С-80 при работе в сельском хозяйстве, 1949 г. Восстановительный ремонт базисных деталей тракторов С-60 и С-65, 1949 г. Узловой метод ремонта тракторов, 1951 г. Рациональное планирование и организация ремонта смешанного парка тракторов в МТС узловым методом, 1954 г. Восстановление изношенных деталей автоматической вибродуговой наплавкой, 1956 г. Агрегатный метод устранения отказов комбайнов СК-4, 1974 г. Технология восстановления коленчатых валов дизельных ДВС, 1981 г.
Клековкин Г.П.	Разработка способа автоматической импульсно-дуговой наплавки в струе охлаждающей жидкости, 1962 г.
Авдеев М.В.	Исследование и расчет остаточных напряжений в деталях, восстановленных вибродуговой наплавкой, 1965 г.
Дудин Б.М.	Исследование механизированного процесса электроимпульсного наращивания изношенных деталей тракторов и сельскохозяйственных машин на переменном токе, 1968 г.
Борисенко В.А.	Исследование динамической деформационной обработки, совмещенной с вибродуговой наплавкой восстанавливаемых деталей, 1970 г.

В.В. Бледных, занимаясь совершенствованием почвообрабатывающих машин и агрегатов, проводила многочисленные полевые испытания в колхозах и совхозах Южного Урала. Машинно-тракторные станции и колхозы выступали опытной площадкой для проведения научно-исследовательских разработок. Данные, полученные в результате полевых испытаний, позволяли уточнять расчетные схемы математического описания процессов: движения агрегата в транспортном положении, при заглублинии плуга, при переводе плуга из рабочего положения в транспортное.

Применение системы автоматизированного проектирования при совершенствовании рабочих органов почвообрабатывающих машин учитывало такие особенности технологического процесса резания и движения пласта почвы, как засоренность поля сорной растительностью, влажность почвы, трение почвы о поверхность рабочего органа. Результатом научных исследований было постепенное приближение получаемых математических моделей к реальным условиям работы почвообрабатывающих машин и агрегатов.

На современном этапе развития научной школы А.И. Любимова ведутся исследования по адаптивным технологиям возделывания сельскохозяйственных культур применительно к почвенно-климатическим условиям различных регионов.

Запуск первого в стране поточного производства тяжелых гусеничных тракторов (ЧТЗ) потребовал участия научных работников ЧИМЭСХ, которые работали над созданием средств контроля

технического состояния трактора, разрабатывали оборудование, позволяющее фиксировать технические параметры трактора при его испытании [7].

Е.М. Харитончик, П.И. Саяпин, И.Е. Ульман входили в состав технического совета Челябинского тракторного завода и решали различные инженерные задачи: уменьшение потерь при буксовании и перекачивании трактора, перевод тракторных двигателей С-60, С-65 на работу от газогенераторных установок, работающих на твердом топливе.

Имевший большой практический опыт обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники И.Е. Ульман внес конструктивные изменения в систему подачи топлива в цилиндры двигателя трактора С-60, что позволило перевести трактор на более дешевый вид топлива (керосин вместо легроина).

В 1936 г. Наркомтяжпром поручил разработку газогенераторной установки институту НАТИ.

Е.М. Харитончик и В.Я. Мамин усовершенствовали конструкцию газогенератора Г-25, сконструировав штампованную двухфурменную газификационную камеру и устройство для автоматического золоудаления. Все опытно-конструкторские решения сразу же были внедрены в производство [8].

Совместная работа ученых ВИМа и ЧМЭСХ по вопросам ремонта первого трактора С-60 завершилась изданием в 1937 г. книги «Техника ремонта трактора ЧТЗ «Сталинец-60» (И.Е. Ульман, А.И. Селиванов, А.Ф. Бондаренко).

Тесное сотрудничество кафедры ремонта машин с машинно-тракторными станциями Южно-

го Урала во время Великой Отечественной войны способствовало внедрению простейших технологий восстановления деталей сельскохозяйственной техники: технологии «натирания стальных деталей чугуном» (цементация пастой при температуре 920-930 °С), термодиффузионное наращивание бронзовых деталей. Технологии ремонта публиковались в виде рекомендаций, статей и брошюр для внедрения в практику ремонтного производства на всех МТС региона и на фронтах, где в большом количестве эксплуатировались тракторы С-60 и С-65.

В послевоенные годы научные школы под руководством И.Е. Ульмана и Е.М. Харитончика занимались испытанием новой модели тракторов С-80 в МТС Челябинской области. В процессе взаимодействия представителей научных школ ЧИМЭСХ с производством и машинно-тракторными станциями в основном решались опытно-конструкторские задачи.

Проведение таких работ способствовало формированию на предприятиях и машинно-тракторных станциях специалистов, занимающихся изобретательством и рационализаторством. Это в свою очередь вывело районные машинно-тракторные станции на новый уровень. Так, Челябинская МТС реорганизовалась в предприятие по производству сельхозтехники «Агромаш», а Варненская МТС – в ремонтно-техническое предприятие.

Совместная научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа ГОСНИТИ, МТС, ЧИМЭСХ велась по разработке и выпуску конструкций пятидесяти автоматических линий по восстановлению лемехов. Было выпущено 620 двенадцатикорпусных плугов-рыхлителей. Челябинская область была полностью обеспечена отвальными плугами для вспашки земли собственного производства. На производстве «Агромаш» было изготовлено 10 трубных станков для изготовления спирально-шовных труб РТ-180.

В конце 40-х – начале 50-х гг. прошлого века наблюдалось тесное сотрудничество между научными школами ЧИМЭСХ и ВИМ. Работая над общей научной проблемой двухфазного обмолота зерна, К.Г. Колганов и Я.М. Жук с аспирантом создали экспериментальный стенд (в ВИМе), на котором отработывались оптимальные режимы обмолота. Проведенные двумя научными школами изыскания позволили в 70-е гг. на ГСКБ «Ростсельмаш» создать семейство макетных образцов двухбарабанных комбайнов под условной маркой ВИГ (ВИМ – ГСКБ) [9].

Дальнейшая работа учеников научной школы К.Г. Колганова была направлена на отработку режимов и параметров двухбарабанных агрегатов на разных культурах. Особое внимание уделялось вопросам минимизации травмирования зерна, исследованию сепарирующего эффекта.

Большое влияние на развитие научных школ Южного Урала оказали отраслевые лаборатории, созданные на базе Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства.

В 1967 г. в данном институте была открыта первая проблемная лаборатория под руководством В.В. Бледных, использующая вычислительную технику при проектировании сельскохозяйственных машин и технологических процессов. Результатом работы лаборатории был выпуск в 1970 г. пособия для студентов вузов «Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах» [10].

Основанная в 1968 г. отраслевая научно-исследовательская лаборатория при кафедре ремонта машин занималась разработкой технологических процессов восстановления работоспособности и повышения надежности ремонтируемых сельскохозяйственных машин [11].

Ремонтно-технологическое оборудование лаборатории позволяло восстанавливать коленчатые валы, катки тракторов, шестерни, шлицевые валы методами вибродуговой наплавки, электроконтактной обработки, наплавки с пластическим деформированием, наплавки под слоем флюса и др [12].

В последующие годы ученые научной школы И.Е. Ульмана занимались вопросами надежности, ресурсосбережения при техническом сервисе сельскохозяйственных машин, обеспечения работоспособности трибомеханической системы «кольцо подшипника – корпус» [13, 14].

За время работы отраслевой лаборатории 17 районных объединений «СХТ» Московской, Тюменской, Челябинской области были оснащены установками по восстановлению различных деталей сельскохозяйственных машин.

**Выводы.** Профессорско-преподавательский состав научных школ Южного Урала в полной мере использовал все имеющиеся в регионе и за его пределами ресурсы: тесную связь внутри отраслевого научного сообщества (ВИМ, ГОСНИТИ, НАТИ), плотную работу с передовыми производственными (ЧТЗ, Агромаш) и сельскохозяйственными (МТС) предприятиями. Все передовые научные разработки внедрялись не только на производство, но и в учебный процесс.

**Библиографический список**

1. Бледных В.В. Становление агроинженерной науки на Урале // *Достижения науки и техники АПК*. 2007. N5. С. 39-44. EDN: ISVPPFH.
2. Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала). *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12>.
3. Панов И.М., Ветохин В.И. Современное состояние и перспективы развития земледельческой механики в свете трудов В.П. Горячкина // *Агроинженерия*. 2008. N2. С. 9-14.
4. Шаров В.В. Аспекты наследия академика В.П. Горячкина // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N3. С. 65-71. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-65-71>.
5. Рахимов Р.С., Рахимов И.Р., Ялалетдинов Д.А. и др. Разработка технологии и изготовление импортозамещающего комплекса машин для возделывания сельскохозяйственных культур // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. N1. С. 86-96. DOI: 10.30766/2072-9081.20120.21.1.86-96.
6. Ерохин М.Н. Творец агроинженерной науки. К 150-летию со дня рождения почетного академика В.П. Горячкина // *Вестник Российской академии наук*. 2018. Т. 88. N7. С. 650-658. DOI: 10.31857/S086958730000089-5.
7. Бледных В.В. Ульман Иона Ефремович. К 100-летию со дня рождения // *Достижения науки и техники АПК*. 2007. N11. С. 56.
8. Харитончик Е.М. Буксование и потери на перекачивание тракторов // *Труды Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства*. 1941. Вып. 1. С. 5-20.
9. Жалнин Э.В. Постулаты В.П. Горячкина и их дальнейшее развитие // *Агроинженерия*. 2008. N2. С. 15-21.
10. Бледных В.В. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах. Челябинск: Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. 1970. 108 с.
11. Вахрушев В.В., Егоров А.В., Зубова Е.В. Оценка показателей надежности силовой передачи зерноуборочного комбайна JOHN DEERE 9600 // *АПК России*. 2015. Т. 73. С. 41-48. EDN: ULFOBX.
12. Маширабов Н. Королькова Л.И. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники высокоскоростной дуговой наплавкой // *Агропродовольственная политика России*. 2012. N2. С. 81-83. EDN: PWYTXB.
13. Вахрушев В.В., Иванов Н.М., Немцев А.Е. Оценка работоспособности моторных масел по краевому углу смачивания // *Научно-технический вестник: техни-*

*ческие системы в АПК*. 2021. N2(10). С. 76-83. EDN: RFIFKD.

14. Вахрушев В.В., Егоров А.В., Зубова Е.В. Обеспечение работоспособности трибомеханической системы «кольцо подшипника–корпус» в коробках передач транспортных и технологических машин агропромышленного комплекса применением полимерных материалов акрилового ряда // *АПК России*. 2016. Т. 75. N1. С. 65-70. EDN: VSAOSX.

**References**

1. Blednykh V.V. Formation of agricultural engineering science in the Urals. Achievements of science and technology in agro-industrial complex. 2007. N5. 39-44 (In Russian). EDN: ISVPPFH.
2. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school. *Agricultural machines and technologies*. 2023. Т. 17. N2. 4-12 (In Russian). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12>.
3. Panov I.M., Vetokhin V.I. Current state and prospects for the development of agricultural mechanics in the light of the works of V.P. Goryachkina. *Agricultural engineering*. 2008. N2. 9-14 (In Russian).
4. Sharov V.V. Aspects of the scientific legacy of academician V.P. Goryachkin. *Agricultural engineering*. 2023. Т. 25. N3. 65-71 (In Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-65-71>.
5. Rakhimov R.S., Rakhimov I.R., Yalaletdinov D.A., et al. Development of technology and manufacturing of an import-substituting complex of machines for cultivating crops. *Agricultural science of the Euro-North-East*. 2020. N1. 86-96 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.20120.21.1.86-96.
6. Yerokhin M.N. The creator of agroengineering science. to the 150th anniversary of the birth of honorary academician V.P. Goryachkin. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2018. Т. 88. N7. 650-658 (In Russian). DOI: 10.31857/S086958730000089-5.
7. Blednykh V.V. Ulman Iona Efremovich. To the 100th anniversary of his birth. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2007. N11. 56 (In Russian).
8. Kharitonchik E.M. Slipping and rolling losses of tractors. *Proceedings of the Chelyabinsk institute of mechanization and electrification of agriculture*. 1941. Is. 1. 5-20 (In Russian).
9. Zhalnin E.V. Postulates of V.P. Goryachkina and their further development. *Agricultural engineering*. 2008. N2. 15-21 (In Russian).
10. Blednykh V.V. Computer technology in engineering

and economic calculations. Chelyabinsk: Chelyabinsk institute of mechanization and electrification of agriculture. 1970. 108 (In Russian).

11. Egorov A.V., Zubova E.V., Vakhrushev V.V. Assessing the power transmission reliability indicators of a JOHN DEERE 9600 combine harvester. *Agroindustrial Complex of Russia*. 2015. Vol. 73. 41-48 (In Russian). EDN: ULFOBX.

12. Mashrabov N. Korolkova L.I. Restoration of parts of agricultural machinery by high-speed arc surfacing. *Agro-food policy in Russia*. 2012. N2. 81-83 (In Russian). EDN: PWYTXB.

13. Vakhrushev V.V., Ivanov N.M., Nemtsev A.E. Estimation of the performance of motor oils on edge wetting angle. *Scientific and Technical Bulletin: technical systems in agriculture*. 2021. N2(10). 76-83 (In Russian). EDN: RFIFKD.

14. Vakhrushev V.V., Egorov A.V., Zubova E.V. Providing the functionality of the tribomechanical system "bearing ring-case" when using polymeric materials of acrylic series. *Agroindustrial Complex of Russia*. 2016. T. 75. N1. 65-70 (In Russian). EDN: VSAOSX.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author have read and approved the final manuscript.

**Статья поступила в редакцию 15.12.2023**

**Статья принята к публикации 20.02.2024**



## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал «ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС МАШИН» включен в Перечень изданий, рекомендованных **ВАК РФ** для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям: 4.3.1 / 5.6.6. Приказ Минобрнауки РФ №118 от 24.02.2021 г.

Журнал включен в Российский индекс цитирования (**РИНЦ**) и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству **AGRIS**. Полные тексты статей размещены на сайте электронной библиотеки: <http://elibrary.ru>.

Статья, направляемая в журнал для публикации, должна соответствовать основной тематике журнала. Поступивший в редакцию материал проходит двойное слепое рецензирование. Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, набранные в Word шрифтом 14 пт. Times New Roman через 1,5 интервала, не более 20 страниц. Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – jpg или tif с разрешением 300 dpi, графики, диаграммы – в eps или ai. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул Microsoft Word без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть в редакторе формул. Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на формулы обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.

**В каждой статье должны быть указаны следующие данные:**

- название статьи;
- фамилия, имя и отчество автора (ов);
- e-mail автора, контактный телефон;
- место работы автора(ов) (аббревиатуры не допускаются),
- почтовый адрес;

- ученая степень, ученое звание автора;
- реферат;
- ключевые слова;
- библиографический список.

**Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:**

- Введение (актуальность);
- Цель исследования;
- Материалы и методы;
- Результаты и обсуждение;
- Выводы.

**Библиографический список** (от 15 источников за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследования, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы. Объем реферата – 200-250 слов.

В реферате нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:

- название статьи;
  - место работы автора (ов);
  - реферат и ключевые слова;
  - названия литературных источников.
- Машинный перевод недопустим!

В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

**Адрес для отправления материалов:**

e-mail: [tsmvim@mail.ru](mailto:tsmvim@mail.ru); [valpal-1938@mail.ru](mailto:valpal-1938@mail.ru)  
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, дом 1, с отметкой «Технический сервис машин»,  
Лялякину Валентину Павловичу.  
Телефон для справок: 8 (499) 174-88-11;  
8 (495) 371-21-44.

## REQUIREMENTS TO THE DESIGN OF ARTICLES

The journal “Technical Service of Machines” is included in the List of Publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation for the publication of the works of applicants for academic degrees of candidate and Doctor of Sciences in the specialties: 4.3.1 / 5.6.6. Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation №118 24.02.2021.

The journal is included in the Russian Scientific Citation Index (RSCI) and in the International information system on agriculture **AGRIS**. The full texts of the articles are available on the website of the electronic library: <http://elibrary.ru>.

The article sent to the journal for publication should match to the main theme of the journal. The material received by the editorial office is double-blind peer-reviewed. A negative review is a cause for refusing the publication.

The editorial Board accepts manuscripts and electronic versions of articles typed in Word with fontsize of 14 pt., Times New Roman interlinear interval of 1.5 and not exceeding 20 pages.

The formulas given in the article should have explanations of all the values included in them with the measurement units in SI. Graphic materials should be attached as separate files: photos – jpg or tif with a resolution of 300 dpi, graphics, diagrams – in eps or ai. All graphic materials, drawings and photos should be numbered, signed and have a link in the text.

Simple inline and single-line formulas must be typed in characters in the Microsoft Word formula editor without using special editors. It is not allowed to set part of the formula with symbols, and part in the formula editor. If the formulas are taken from other sources, it is not necessary to give them detailed explanation: the authors of the formulas have already done that, they should not be repeated. Links to notation of the formulas is required. The article should contain no more than 10 formulas, 3-4 illustrations, 3-4 tables, tables must be not larger than 1/2 page.

Each article should contain the following information:

- article title;
- surname, name and patronymic of the author (authors);
- e-mail of the author, contact phone number;
- work place of the author(s) (abbreviations are not allowed), postal address;

- academic degree, academic title of the author;
- abstract;
- keyword;
- bibliographic list.

The article should be structured by specifying the following sections:

- Introduction (relevance);
- Research purpose;
- Materials and methods;
- Results and discussion;
- Conclusions.

Bibliographic list (from 10 sources for the last 5 years) should be prepared in accordance with GOST R 7.05-2008.

**Abstract.** The abstract is a finished material. The introductory part is minimal. It is necessary to briefly and succinctly reflect the relevance and purpose of research, conditions and schemes of experiments, to present the results (with the obligatory reasoning based on digital material), to formulate conclusions. The size of the abstract – 200-250 words.

Abbreviations and complex formatting elements (such as superscripts and subscripts) should not be used in the abstract.

The next must be translated in English:

- article title;
- work place of the author (s);
- abstract and keywords;
- names of literary sources.

Machine translation is not allowed!

At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

The manuscript should be signed by the authors. The author is legally and otherwise responsible for the content of the article.

If the article do not match with at least one of the listed conditions, it may serve as a basis for refusing the publication.

### **Address for sending materials:**

e-mail: [tsmvim@mail.ru](mailto:tsmvim@mail.ru); valpal-1938@mail.ru  
109428, Moscow, 1-st Institutsky Proezd, Building 1, FGBNU FNAC VIM.

With the note “*Machinery technical service*”, addressed to Lyalyakin Valentin Pavlovich.

Telephone for information: 8 (499) 174-88-11;  
8 (495) 371-21-44.

