

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.77.04

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-77-83>

Перспективы применения технологии 3D-печати сваркой в сельском хозяйстве

Ю.В. Катаев¹, А.В. Чавдаров²^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ ykataev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>² info@firma-tom.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

Аннотация. Значительный износ металлических деталей сельскохозяйственных машин и оборудования предопределяет необходимость их восстановления наиболее рациональными и недорогими методами. Исследования проведены с целью определения наиболее перспективного и экономически выгодного способа создания и ремонта деталей сельскохозяйственных машин аддитивными технологиями. Анализ методов 3D-печати металлом по стоимости оборудования и сложности технологического процесса показывает целесообразность использования устройств для пространственной ориентации сварочной горелки при использовании широко применяемых сварочных проволок различного состава. Для сельскохозяйственных предприятий при восстановлении геометрии изношенных деталей и изготовлении новых пространственных конструкций из металла наиболее рационально использовать технологии полуавтоматической сварки. Технология DED-W/WAAM/3DMP отличается наибольшей производительностью (до 800 см³/ч) и наименьшей стоимостью среди принтеров по металлу (без применения специальных роботов). При этом возможно использование фрезерно-гравировальных станков как для печати металлом, так и для последующей механической обработки. Результаты полевых испытаний рабочих органов, упрочненных прерывистыми износостойкими валиками WAAM-методом, показывают, что при наработке в 24,785 га на лемех износ линейного размера режущей кромки по ширине упрочненных лемехов в среднем на 10...11 мм меньше, чем у неупрочненных. Внедрение аддитивных технологий в систему технического обслуживания и ремонта крупных и средних сельскохозяйственных предприятий на основе фрезерно-гравировальных станков и комплекта для полуавтоматической сварки позволит повысить эффективность использования 3D-печати сваркой при восстановлении деталей машин, снизив при этом скорость изнашивания на 30...40%.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника; аддитивные технологии; технология ремонта; 3D-печать; упрочнение; полевые испытания; эффективность

Для цитирования: Катаев Ю.В., Чавдаров А.В. Перспективы применения технологии 3D-печати сваркой в сельском хозяйстве // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 77-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-77-83>

ORIGINAL ARTICLE

Prospects for the application of 3D printing by welding in agriculture

Yu. V. Kataev¹, A. V. Chavdarov²^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ ykataev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>² info@firma-tom.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

Abstract. Significant wear of metal components in agricultural machinery and equipment necessitates their restoration using the most rational and cost-effective methods. The research aimed to identify the most promising and economically viable method for the designing and repair of agricultural machinery parts using additive technologies. An analysis of metal 3D printing methods based on equipment cost and process complexity indicates the feasibility of using devices for spatial orientation of the welding torch when employing widely available welding wires of various compositions. For agricultural enterprises, the most rational approach for restoring the geometry of worn parts and manufacturing new spatial metal structures is the use of semi-automatic welding technologies. The DED-W/WAAM/3DMP technology offers the highest productivity (up to 800 cm³/h) and the lowest cost among metal printers (without the use of specialized robots). Additionally, milling and engraving machines can be utilized both for metal printing and for subsequent mechanical processing. Field test results of working elements reinforced with intermittent wear-

resistant beads using the WAAM method show that after 24.785 hectares of operation, the linear wear of the blade width on reinforced shares is, on average, 10-11 mm less than that of non-reinforced shares. The integration of additive technologies into the maintenance and repair system of large and medium-sized agricultural enterprises – based on milling and engraving machines and semi-automatic welding kits – will enhance the efficiency of 3D printing by welding in the restoration of machine components while reducing the wear rate by 30-40%.

Keywords: agricultural machinery; additive technologies; repair technology; 3D printing; hardening; field testing; efficiency

For citation: Kataev Yu.V., Chavdarov A.V. Prospects for the application of 3D printing by welding in agriculture. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):77-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-77-83>

Введение

Аддитивные технологии (АТ) активно используются в разных отраслях промышленности во всем мире [1, 2]. По данным Research and Markets, объем мирового рынка аддитивных технологий в 2021 г. составил \$14,4 млрд. К 2030 г. он может увеличиться до \$83,6 млрд. Российский рынок оборудования и услуг 3D-печати к 2022 г. достиг 4,5 млрд руб. В «Белой книге» НИУ ВШЭ отмечено: «В период с 2024 по 2030 гг. на территории России создадут серийное производство материалов и оборудования для 3D-печати, комплектующих и оборудования для постобработки изделий». В результате к 2030 г. объем российского рынка аддитивных технологий может достигнуть 58 млрд руб.

Применение АТ предполагает в большинстве случаев использование программируемого перемещения условно печатающей головки для послойного создания изделий по заранее созданной математической модели. В качестве головки может выступать сопло для подачи и плавления пластиковой проволоки, или электрическая дуга совместно с порошком или проволокой. Головка должна перемещаться согласно управляющей программе. При написании управляющей программы должно учитываться множество факторов, зависящих от используемой технологии и материалов. Если для используемого на практике пластикового филамента и оборудования уже существуют практические рекомендации и шаблоны программ, то для печати металлом существует очень мало апробированных методик. В развитии АТ принимают участие молодые ученые разных регионов России [3, 4].

Печать металлом (порошком или проволокой) позиционируется не только как метод изготовления деталей [5, 6], но и как способ восстановления геометрической формы изношенных или вышедших из строя изделий [7, 8]. Практика показывает, что около 80% изношенных деталей могут быть восстановлены в номинальный размер наплавкой, напылением и другими способами. При этом затраты на ремонт, как правило, не превышают 25...35% от стоимости новой детали [9, 10].

Внедрение аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники и оборудования способствует поддержанию работоспособности машинно-тракторного парка, эксплуатируемого в сложных полевых и метеорологических условиях [11, 12, 13]. Внедрение новой технологии требует внимательного подхода и оценки ее практического использования.

Цель исследований: определить наиболее перспективные и экономически выгодные способы создания и ремонта деталей сельскохозяйственных машин на основе применения аддитивных технологий.

Материалы и методы

Анализ применения технологий 3D-печати металлом выполнялся на основе нормативно-правовых документов, открытых публикаций научных трудов в этой области исследований. Осуществлена систематизация АТ-методов печати металлическими материалами по стоимости оборудования и сложности процессов.

При составлении управляющих программ упрочняющей наплавки лемехов использовали программу ESI Visual-Weld и Visual-Mesh 12.5. Опытная партия упрочненных рабочих органов в количестве 46 ед. проходила испытания в полевых условиях. Износ определяли измерением геометрических размеров в поперечном сечении в нескольких сечениях. Полученные результаты обрабатывали статистическим методом.

Результаты и их обсуждение

Известно большое количество способов печати металлическими материалами. Анализ используемых источников энергии и применяемых материалов позволил составить общую схему процессов 3D-печати (рис. 1).

Наиболее широкое применение в промышленности получил синтез из порошков на подложке. Чаще всего используется прямое лазерное спекание, при котором готовую деталь получают без постобработки. К недостаткам способа следует отнести высокую стоимость оборудования и расходных материалов. В России подобное оборудование используется

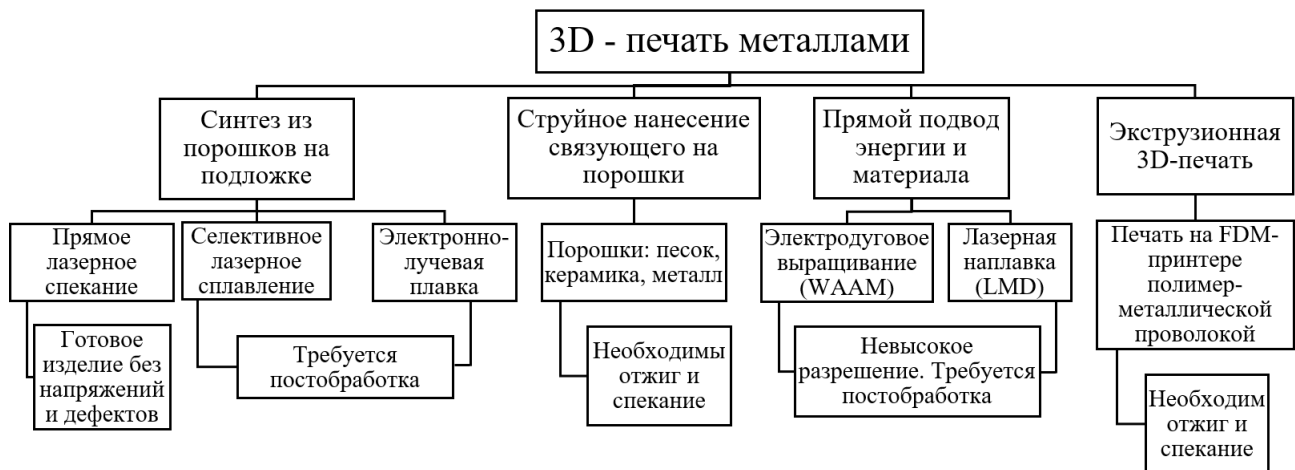


Рис. 1. Схема процессов 3D-печати металлом

Fig. 1. Diagram of metal 3D printing processes

в основном в авиастроении, энергетическом комплексе, в медицине и приборостроении.

Струйное нанесение связующего на порошки чаще применяют в металлургии и тяжелом машиностроении для «выращивания» крупногабаритных деталей. На металлургических комбинатах (Череповец, Челябинск) активно используются данная технология и электродуговое выращивание (WAAM), особенно по программам импортозамещения.

Способ печати на обычном принтере полимер-металлической проволокой в России пока не получил широкого применения по причине отсутствия материалов и необходимости последующего удаления связующего и спекания изделия. При составлении управляющей программы необходимо учитывать, что при термообработке происходит значительная усадка детали. Величина усадки в большей степени зависит от количества и марки используемого наполнителя, и в настоящее время этот фактор является основополагающим при выборе метода получения изделия.

Метод WAAM стал активно использоваться после появления первых программируемых логических контроллеров (ПЛК) и серводвигателей с энкодерами, позволяющих с высокой точностью перемещать инструмент. Установка для наплавки концов рельсов РЖД представлена на рисунке 2 [14].

Программа управления двумя серводвигателями позволяет выполнить восстановительную наплавку на любой площади. Оператор вводит координаты реперных точек и задает шаг наплавки, далее процесс выполняется автоматически. Эта универсальная установка также широко используется при восстановлении рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Большое внимание внедрению новых и перспективных технологий уделяется региональными ведомственными службами и хозяйствами. Большой опыт

работы ФНАЦ ВИМ, ООО «Калужская МТС» и передовых хозяйств Московской, Тульской и Калужской областей по увеличению ресурса деталей сельскохозяйственной техники показал, что существуют два основных класса однотипных деталей, требующих восстановления или упрочнения: детали типа «Вал» и почвообрабатывающие изделия (бороны, плуги, долота, лемеха). В первой группе деталей типа «Вал» износ чаще всего происходит в местах сопряжений с ответной деталью. Для восстановления этих мест требуется выполнение наплавки с последующей механической обработкой. В этих случаях в хозяйствах чаще всего используют ручную электродуговую сварку штучными электродами или полуавтоматическую MIG-сварку. Для снижения износа второй группы деталей (рабочих органов) используют наплавку упрочняющих валиков. Установка для упрочнения, в которой управляющая программа составлена в G-кодах аналогично программам для ЧПУ станков, представлена на рисунке 3. Подобные автоматизированные установки ФНАЦ ВИМ внедрены в ООО «Калужская МТС» и МГТУ им. Н.Э. Баумана для учебного процесса.



Рис. 2. Автоматическая установка для наплавки рельсов

Fig. 2. Automatic rail surfacing unit



Рис. 3. Автоматизированная установка для наплавки рабочих органов:
 1 – сварочный полуавтомат; 2 – компьютер; 3 – блок управления; 4 – рабочий орган;
 5 – станок с программным управлением

Fig. 3. Automated unit for surfacing working parts:
 1 – semi-automatic welding machine; 2 – computer; 3 – control unit; 4 – working tool;
 5 – computer-controlled machine tool (CNC machine)

Нанесение упрочняющих валиков возможно только при наличии специальной управляющей программы и только в автоматическом режиме. Наплавленные на этой установке лемеха представлены на рисунке 4.

Технология нанесения валиков и управляющая программа базируются на математическом исследовании теплового баланса в изделии для предотвращения образования разупрочненных областей и оказания минимального влияния на тяговое усилие при обработке почвы. Оценка теплового состояния лемеха осуществлялась с использованием специализированной программы для моделирования сварки и наплавки ESI Visual-Weld и Visual-Mesh 12.5 (рис. 5).

На основе экспериментальных исследований выявлено, что валики длиной 25...30 мм обеспечивают наиболее эффективное упрочнение. В связи с этим на модели принята длина валиков 30 мм (рис. 6).

Отметим, что затраты на выполнение работ по упрочнению повысили стоимость рабочего органа примерно на 15...20%, но при этом скорость



Рис. 4. Упрочненные дуговой наплавкой лемеха
Fig. 4. Ploughshares reinforced by arc surfacing

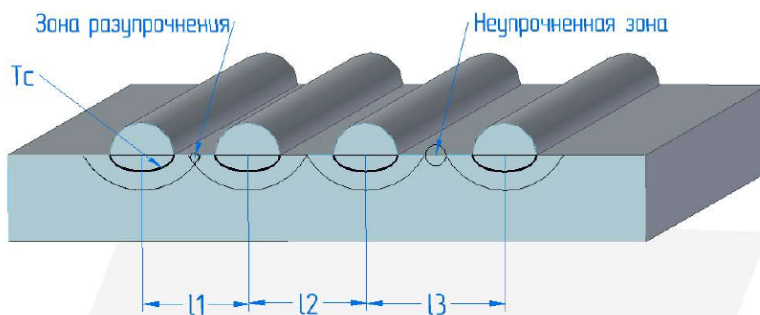


Рис. 5. Схема нанесения наплавленных валиков для оценки теплового состояния лемеха в процессе его упрочнения
Fig. 5. Diagram of deposited roller arrangement for assessing the thermal condition of a ploughshare during its hardening

изнашивания снизилась на 35...45%. В таблице 1 представлены результаты полевых испытаний лемеха и долота, упрочненных прерывистыми износостойкими валиками. Наплавка выполнялась с использованием проволоки Castolin EnDO 30 диаметром 1,2 мм в среде защитного газа.

На основании проведенных испытаний (рис. 7) можно заключить, что упрочненные лемеха, прошедшие полевые испытания, подвержены меньшему износу в отличие от неупрочненных лемехов. При наработке в 24,785 га на лемех износ линейного размера режущей кромки по ширине упрочненных лемехов в среднем на 10...11 мм меньше, чем у неупрочненных.

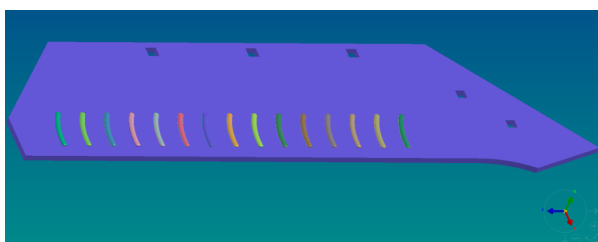


Рис. 6. Оценка теплового состояния лемеха в процессе наплавки упрочняющих валиков

Fig. 6. Assessment of the thermal condition of a ploughshare during surfacing of hardening rollers

При расчете экономической эффективности покупки и внедрения АТ-технологии определяющим фактором является стоимость оборудования для печати металлом и расходных материалов. Ориентировочная стоимость оборудования приведена в таблице 2.

Следует учитывать, что приведенные в таблице 2 цены относятся только к покупке самой (установки) и не включает в себя расходы на дополнительное оборудование для постобработки полученных деталей и покупку программного обеспечения. С учетом этого общая стоимость может повыситься в 2-5 раз в зависимости от технологии печати.

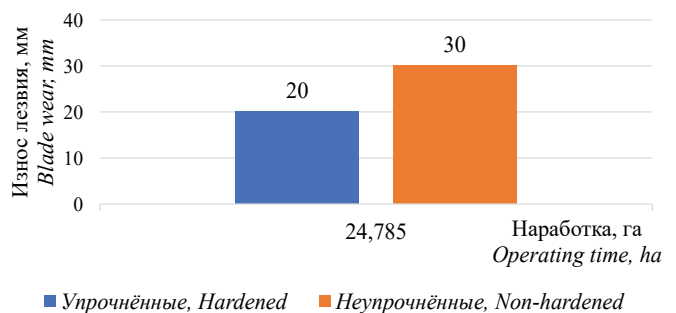


Рис. 7. Износ лезвия лемехов при наработке 24,785 га

Fig. 7. Wear of the ploughshare blade after 24,785 ha of operation

Результаты полевых испытаний наплавленных рабочих органов

Таблица 1

Field test results of surfaced working elements

Table 1

Вид упрочненной детали	Рабочий орган после испытаний	Условия эксплуатации	Результаты полевых испытаний
		Лемех основного корпуса ВЕЛОТА правый. Дата установки: 19.09.2019 г. Дата снятия: 04.10.2019 г. Район обработки: Тарусский. Почвы: дерново-подзолистые	При наработке в 24,758 га износ лезвийной части снизился в среднем на 10...11 мм
		Лемех основного корпуса ВЕЛОТА левый. Дата установки: 08.11.2019 г. Район обработки: Козельский. Почвы: серые лесные.	При наработке в 4,375 га износ лезвийной части составил 1...2 мм
		Долото левое. Дата установки: 21.10.2019 г. Дата снятия: 17.11.2019 г. Район обработки: Козельский. Почвы: серые лесные.	Снижение скорости изнашивания на 25...30% по сравнению с заводским исполнением
		Долото правое. Дата установки: 21.10.2019 г. Дата снятия: 17.11.2019 г. Район обработки: Козельский. Почвы: серые лесные.	При наработке в 18,312 га износ лезвийной части снизился в среднем на 9...11 мм

Таблица 2

Стоимость оборудования для 3-D печати металлом

Table 2

Cost of equipment for metal 3D printing

Бренд	Установка	Примерная цена, тыс. руб.	Технология	Применяемые металлы
BCN3D	Epsilon Series	819	FDM	Нержавеющая сталь 316L, 17-4 PH
Raise3D	Metalfuse Forge1	1080	FDM	Нержавеющая сталь 316L, 17-4 PH
One Click Metal	MPrint+	8100	Лазерное плавление порошка	Нержавеющая сталь 316L, инструментальная сталь, алюминий
H3D HBD	HBD150	18 000	Лазерное плавление порошка	Нержавеющая сталь 316L, инструментальная сталь, алюминий, кобальт-хром, медь, титан
HP	Metal Jet S100	35 910	Струйная печать связующим	Нержавеющая сталь 316L, 17-4 PH
GE Additive	Arcam EBM Q10plus	> 45000	Электронно-лучевая плавка	Титан, кобальт-хром, медь
WAAM3D	RoboWAAM	>45000	Дуговая наплавка	Нержавеющая сталь, инструментальная сталь, алюминий, молибден, никель, титан и др.

Применительно к сельскому хозяйству, где, как правило, требуются гибкость технологии и сокращенное время для ремонта техники, наиболее рациональным является приобретение полнокомплектных установок для WAAM-процессов (рис. 3.) Стоимость фрезерно-гравировального станка, используемого в конструкции данного вида установок, составляет от 150 000 до 300 000 тыс. руб. в зависимости от рабочего поля. Стоимость полного комплекта оборудования для полуавтоматической сварки будет составлять около 250 000 руб. Программное обеспечение поставляется вместе со станком.

Выводы

1. Анализ основных способов печати металлов с применением аддитивных технологий выявил преимущества способа электродугового

выращивания (WAAM) при восстановлении и ремонте машинно-тракторного парка АПК. Технология DED-W/WAAM/3DMP отличается наибольшей производительностью (до 800 см³/ч) и наименьшей стоимостью среди принтеров по металлу (без применения специальных роботов).

2. Полевыми испытаниями подтверждено увеличение срока работы упрочненных методом WAAM рабочих органов на 50%.

3. Внедрение в систему технического обслуживания и ремонта крупных и средних сельскохозяйственных предприятий фрезерно-гравировального станка и комплекта для полуавтоматической сварки позволяет повысить эффективность использования метода выращивания при восстановлении деталей машин, снизив при этом скорость изнашивания на 30...40%.

Список источников

1. Григорьянц А.Г., Лутченко А.В. Современные проблемы развития аддитивных технологий в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 27-30. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-8-27-30>
2. Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Голинский П.В. Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2025. № 27 (3). С. 64-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>
3. Дорохов А.С., Свиридов А.С. Применение аддитивных технологий при техническом сервисе садовой техники // Агроинженерия. 2020. № 6 (100). С. 39-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-39-44>
4. Егоров И.Б., Поздняков Н.А. Применение аддитивной технологии WAAM для ремонта сельскохозяйственных машин и оборудования // Молодые ученые: Современный взгляд на будущее АПК: Сборник X Международной научно-практической конференции, р.п. Краснообск, 15 апреля 2025 г. Новосибирск: Агронаука, 2025. С. 280-284. EDN: MKBHF1

References

1. Grigoryants A.G., Lutchenko A.V. Modern problems of technological development of additive techniques in mechanical engineering. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;8(134):27-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-8-27-30>
2. Tolochko N.K., Auramenka P.V., Kravtsov V.B., Golitskiy P.V. Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):64-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>
3. Dorokhov A.S., Sviridov A.S. Application of additive technologies in the technical service of garden equipment. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2020;6:39-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-39-44>
4. Egorov I.B., Pozdnyakov N.A. Application of additive WAAM technology for the repair of agricultural machinery and equipment. *Molodye uchenye: Sovremenniy vzglyad na budushchee APK: Proceedings of the X International scientific and practical conference,*

5. Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 34-38. EDN: YLNGXU
6. Славкина В.Э., Мирзаев М.А., Лопатина Ю.А. Применение технологии 3D-печати для оптимизации ремонта зубчатых передач // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 58-64. EDN: WPQPOE
7. Слинко Д.Б., Дорохов А.С., Денисов В.А., Лялякин В.П. Практика применения плазменно-порошковой наплавки при восстановлении изношенных деталей машин // Технология машиностроения. 2019. № 3. С. 32-37. EDN: VFRRXP
8. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 584-596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>. EDN: JHHJG
9. Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей // Технический сервис машин. 2025. Т. 63, № 1. С. 102-110. EDN: AYJBHM
10. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Катаев Ю.В., Соломашкин А.А. Новая стратегия технического обслуживания и ремонта машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 9 (291). С. 33-36. EDN: DQBNRT
11. Кузьмин В.Н., Гаврилов А.В. Организация ремонта и технологии восстановления деталей машин в АПК // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 3. С. 33-39. EDN: OFDIRY
12. Kulikov A.A., Nebyshinets Yu.V., Sidorova A.V., Balanovskii A.E. 3D printing technology for metal products: from an automatic design system to a real part. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(4):728-739. EDN: SOWWOR
13. Ерохин М.Н., Дорохов П.В., Дорохов А.С. К вопросу о концентрации напряжений и оптимизации формы переходной поверхности ступенчатого вала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 3. С. 45-55. EDN: JRRWZP
14. Установка для автоматической наплавки рельсовых путей: Патент № RU44682 U1, МПК В23К9/04 / С.А. Бульканов, А.В. Чавдаров, М.М. Берзин, В.С. Деденев, В.Н. Пурехов; заявл. 22.12.2004; Опубли. 27.03.2005. EDN: NJBUVW

Информация об авторах

- ¹ Катаев Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; ykataev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>; SPIN-код: 3082-3850
- ² Чавдаров Анатолий Валентинович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; info@firma-tom.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>; SPIN-код: 2587-8496
- ^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

Ю.В. Катаев – концептуализация, обзор источников литературы, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование; А.В. Чавдаров – создание черновика рукописи, описание результатов и формулирование выводов

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 12.12.2025, после рецензирования и доработки 31.03.2026, принята к публикации 03.04.2026

Krasnoobsk, April 15, 2025. Novosibirsk: Agronauka. 2025:280-284. (In Russ.)

5. Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Application of 3D printing and 3D scanning technologies in the manufacture and repair of agricultural machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;1:34-38. (In Russ.)

6. Slavkina V.E., Mirzaev M.A., Lopatina Yu.A. Using 3A-printing technology to optimize gear repair. *Machinery Technical Service*. 2020;1:58-64. (In Russ.)

7. Slinko D.B., Dorokhov A.S., Denisov V.A., Lyalyakin V.P. Practice of using plasma-powder surfacing in the restoration of worn machine parts. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2019;3:32-37. (In Russ.)

8. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive technologies for production and repair of agricultural equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584-596 (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

9. Tsench Yu.S., Mironov D.A., Pyzhov V.V. Development of methods for restoring tractor engine parts. *Machinery Technical Service*. 2025;63;1:102-110. (In Russ.)

10. Chernov Ivanov V.I., Denisov V.A., Kataev Yu.V., Solomashkin A.A. A new strategy for the maintenance and repair of machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;9:33-36. (In Russ.)

11. Kuzmin V.N., Gavrilov A.V. Organization of repair and restoration technologies for machine parts in the agro-industrial complex. *Machinery Technical Service*. 2024;62(3):33-39. (In Russ.)

12. Kulikov A.A., Nebyshinets Yu.V., Sidorova A.V., Balanovsky A.E. 3D printing technology for metal products: from a computer-aided design system to a real part. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):728-739.

13. Erokhin M.N., Dorodov P.V., Dorokhov A.S. Stress concentration and shape optimization for a fillet surface of a step-shaped shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;3:45-55. (In Russ.)

14. Bulkanov S.A., Chavdarov A.V., Berzin M.M. et al. Unit for automatic surfacing of rail tracks: Patent No. RU44682 U1 IPC B23K9/04 / applied on 22.12.2004; issued on 27.03.2005. (In Russ.)

Author Information

Yuriy V. Kataev¹, CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer; ykataev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>; Scopus ID: 57209744442

Anatoliy V. Chavdarov², CSc (Eng), Lead Research Engineer; info@firma-tom.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Authors Contribution

Yu.V. Kataev – conceptualization, literature review
A.V. Chavdarov – writing – original draft; validation; results and conclusions

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 12.12.2025; Revised 31.03.2026; Accepted 03.04.2026