

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>**Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки****А.В. Лапаев¹, О.М. Мельников²**¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; г. Москва, Россия² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ a9162968177@yandex.ru² ommelnikov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>

Аннотация. Одним из эффективных способов восстановления работоспособности соединения «Вал-манжета» является использование ремонтных тонкостенных втулок. Установка их на валы обеспечивает восстановление герметичности соединения без разборки агрегата в минимальные сроки и в полевых условиях. Коллектив авторов изготовил ремонтные тонкостенные втулки с толщиной стенки 0,25 мм. Исследования проведены с целью выбора способа упрочнения поверхности тонкостенной втулки до микротвердости выше 21000 МПа, превышающей микротвердость кварцевого абразива и оксида алюминия, входящих в основной состав пыли. Проанализировав методы поверхностного упрочнения, авторы сделали заключение о применимости для тонкостенных ремонтных втулок методов электролитического хромирования и физического осаждения покрытий (PVD). Поверхностное упрочнение тонкостенных втулок электролитическим хромированием (Хтв 21) провели при температуре 45...55°C, покрытие нитридом титана (TiN) получили методом PVD при температуре 200...450°C. Толщину покрытия измеряли электромагнитным толщиномером защитных покрытий Константа К5. Микротвердость полученной упрочненной поверхности определили на приборе ПМТ-3М. Шероховатость упрочненных рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок измеряли профилометром MarSurf M400. В результате поверхностного упрочнения тонкостенных втулок толщина хромового покрытия составила 21...30 мкм, а нитрида титана – 4,2...5,2 мкм. Установили, что при электролитическом хромировании микротвердость поверхности втулки достигала 11000...12000 МПа, а метод PVD обеспечил микротвердость 18900...21700 МПа. Профилограмма упрочненной рабочей поверхности втулки показала уменьшение шероховатости на один класс чистоты поверхности. Результаты исследований доказывают применимость выбранных методов упрочнения ремонтных тонкостенных втулок толщиной от 0,25 мм.

Ключевые слова: вал-манжета, уплотнения, ремонтная тонкостенная втулка, электролитическое хромирование, метод PVD, покрытие хрома, покрытие нитридом титана, микротвердость

Для цитирования: Лапаев А.В., Мельников О.М. Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 77-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>

ORIGINAL ARTICLE

Selecting a method of surface hardening for thin-walled repair bushings**A.V. Lapaev¹, O.M. Melnikov²**¹ Moscow State Technological University "STANKIN"; Moscow, Russia² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ a9162968177@yandex.ru² melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>

Abstract. One of the effective ways to restore the serviceability of the "shaft-seal" joint is the use of thin-walled repair bushings. When installed on shafts, they restore the joint tightness without disassembling the unit in shortest time and field conditions. The team of authors have produced thin-walled repair bushings with a wall thickness of 0.25 mm. They have made research to choose a surface hardening method for thin-walled bushing to achieve a microhardness of above 21,000 MPa. This value exceeds that of quartz abrasive and aluminum oxide, which are the main components of dust. Having analyzed the methods of surface hardening, the authors approved the applicability of electrolytic chromium plating and physical vapor deposition of coatings (the PVD method) for thin-walled repair bushings. Thin-walled bushings were surface hardened by electrolytic chromium plating (Хтв

21 (Cr hard)) at a temperature of 45 to 55°C, titanium nitride (TiN) coating was obtained by the PVD method at a temperature of 200 to 450°C. The coating thickness was measured with a Konstanta K5 electromagnetic thickness gauge used for protective coatings. The microhardness of the hardened surface was determined with a PMT-3M device. The roughness of hardened working surfaces of thin-walled repair bushings was measured with a MarSurf M400 profilometer (a surface finish gauge). After surface hardening of thin-walled bushings, the thickness of chrome coating was 21 to 30 microns, and that of titanium nitride – 4.2 to 5.2 microns. Electrolytic chromium plating resulted in a microhardness of bushing surface of 11,000 to 12,000 MPa, while the PVD method provided a microhardness of 18,900 to 21,700 MPa. The profile diagram of the hardened working surface of a bushing showed that the roughness value decreased by one degree of fineness. The research results have proved the applicability of the chosen methods of hardening thin-walled repair bushings with a thickness from 0.25 mm.

Keywords: shaft-seal joint, seal assemblies, thin-walled repair bushing, electrolytic chromium plating, PVD method, chromium coating, titanium nitride coating, microhardness

For citation: Lapaev A.V., Melnikov O.M. Selecting a method of surface hardening for thin-walled repair bushings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):77-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-77-83>

Введение

Обеспечение качества изготовления и ремонта машин и агрегатов для сельского хозяйства является сложной инженерной задачей [1, 2]. В сельскохозяйственном производстве машинно-тракторные агрегаты часто работают в условиях повышенной запыленности.

При эксплуатации сельскохозяйственная техника подвержена воздействию твердых абразивных частиц. В своих исследованиях С.П. Казанцев утверждает: «Механическое разрушение поверхностей деталей машинно-тракторных агрегатов происходит в результате микрорезания и царапания их абразивными частицами. Абразивное изнашивание является наиболее распространенным и быстро протекающим видом изнашивания деталей сельскохозяйственной техники вследствие высокой степени концентрации контактных напряжений на локальных участках рабочих поверхностей деталей»¹.

Износ деталей в соединении «Вал-манжета» ведет к потере герметичности, что является одной из самых распространенных причин выхода агрегатов техники из строя [3, 4]. В энергонагруженных тракторах до 30% отказов происходит по причине утечек в уплотнениях и потери масел и жидкостей в гидросистемах, для гидроагрегатов количество отказов составляет более 40% [5]. Дефектация деталей агрегатов сельскохозяйственной техники при капитальном ремонте показывает, что более 70% валов требуют восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями [6] и все уплотнительные

устройства требуют замены. Нарушение работоспособности уплотнений является основной причиной аварийных разрушений подшипниковых узлов.

Одним из эффективных способов восстановления работоспособности соединения «Вал-манжета» без разборки агрегата является использование ремонтных тонкостенных втулок [7, 8]. Также втулки можно устанавливать на валы при сборке нового агрегата с целью обеспечения необходимых характеристик ответной с манжетой поверхности, отличной от характеристик материала, из которого изготовлен вал.

Преимущества ремонтных тонкостенных втулок:

- восстановление оптимального натяга в соединении «Вал-манжета» при изношенной манжете и выработке на валу;
- продление жизненного цикла уплотнительного узла;
- совместимость втулки с оригинальным уплотнением;
- отсутствие необходимости шлифования, металлизации или других видов обработки вала;
- снижение трудозатрат на ремонт техники, так как восстановление работоспособности уплотнительных устройств валов происходит без разборки агрегатов;
- возможность устранения неисправности в полевых условиях.

Цель исследований: выбор способа упрочнения поверхностного слоя ремонтной тонкостенной втулки для повышения работоспособности уплотнительного соединения подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы

Выбор оптимального способа упрочнения поверхности тонкостенных втулок осуществляли на основании теоретических исследований способов

¹ Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2006. 301 с. EDN: NOANMR.

упрочнения деталей. Разработанным авторами способом удалось изготовить тонкостенные втулки² из низколегированной и высоколегированной коррозионно-стойких сталей 40Х и 12Х18Н10Т (рис. 1).

Для вала диаметром $D = 45h10$ ($45_{-0,1}^{+0,1}$ мм) изготовили втулки толщиной 0,25 мм. Эта минимальная толщина ремонтной втулки обусловлена сложностью изготовления детали. При изготовлении втулок применили способ высокоскоростной токарной обработки.

Для манжет с внутренним диаметром $D_0 = 45_{-4,58}^{+2,75}$ мм и валом с диаметром $D = 45h10$ ($45_{-0,1}^{+0,1}$ мм) на основании расчетов [9] определили оптимальные размеры толщины тонкостенной втулки $S_B = 0,25 \dots 0,8$ мм.

Поверхностное упрочнение образцов ремонтных тонкостенных втулок проводили методами электролитического хромирования и физического осаждения покрытий (PVD). Электролитическое покрытие хрома микротвердостью поверхности 11000...16000 МПа наносили в диапазоне температур 45...55°C. Покрытие нитридом титана микротвердостью 18900...21700 МПа наносили при 200...450°C методом PVD.

Толщину покрытия измеряли многофункциональным электромагнитным толщиномером защитных покрытий «Константа К5». Принцип работы прибора основан на использовании комбинации импульсного индукционного и вихретокового частотного (параметрического) методов получения первичной информации.

Микротвердость полученной упрочненной поверхности определили на приборе ПМТ-3М по стандартной методике в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Измеряли по одной втулке из партии, насчитывающей 10 шт. Для обеспечения точности измерений тонкостенная втулка была разрезана.

Измерения толщины и микротвердости покрытия на основе нитрида титана проводили в трех точках для одной втулки из партии.

Шероховатость упрочненных рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок измеряли профилометром MarSurf M400.

Результаты и их обсуждение

Преимуществом тонкостенной ремонтной втулки является ее толщина. Установка ее на вал позволяет восстановить герметичность соединения «Вал-манжета» без разборки агрегата в минимальные сроки даже в полевых условиях. Минимальные размеры стенки втулки ставят перед разработчиками ряд задач по выбору способа упрочнения.

Анализ состава пыли в различных регионах России показывает, что содержание кварца, имеющего микротвердость 10500...11300 МПа, составляет 70...80%, оксида алюминия (21000 МПа) – до 14% [10, 11]. Соответственно микротвердость поверхностного слоя втулки должна быть не менее 11000 МПа, а по возможности превышать 21 000 МПа.

Износостойкость и коррозионная стойкость изделий увеличиваются с применением электролитических покрытий (Cu, Cr, Ni и т.д.). Твердое хромирование дает микротвердость поверхности до 16000 МПа. Покрытия, обладающие повышенной износостойкостью (карбиды, нитриды, карбонитриды тугоплавких металлов), можно получить методами физического осаждения (PVD), химического осаждения покрытий (CVD) или химико-термической обработкой – в частности, методом диффузионной металлизации.

Для протекания реакций химического осаждения из газовой фазы (CVD метод) требуется температура до 1100°C. Поверхностное насыщение стали металлами при диффузионной металлизации происходит при температуре 900...1200°C,

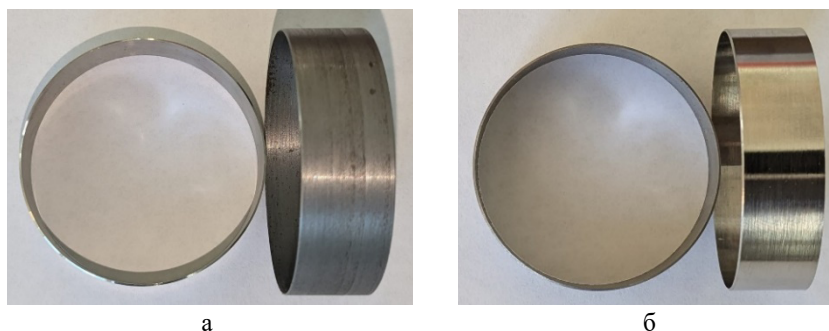


Рис. 1. Ремонтная тонкостенная втулка из сталей 40Х (а) и 12Х18Н10Т (б)

Fig. 1. Thin-walled repair bushing made of 40X(a) and 12X18H10T (b) steels

² Способ ноу-хау находится на этапе оформления (примеч. авт.).

что ведет к росту внутренних напряжений, и как следствие – к изменению геометрической формы детали (короблению).

Другие высокотемпературные методы нанесения износостойких покрытий также неприемлемы для ремонтной тонкостенной втулки в связи с неизбежным ее короблением при высоком нагреве.

Метод PVD применим для различных материалов, нанесение покрытий осуществляют при температуре до 450°C. При этом создаваемая небольшая толщина покрытия (1,5...10 мкм) является несомненным преимуществом в случае упрочнения поверхностного слоя тонкостенной втулки. Кроме того, PVD-покрытия обладают более высокой трещиностойкостью, повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью.

В результате анализа методов поверхностного упрочнения выявлено, что для тонкостенных ремонтных втулок с толщиной стенки 0,25...0,8 мм применимы два метода низкотемпературного упрочнения поверхности: электролитическое хромирование и физическое осаждение покрытий (PVD) (рис. 2).

Поверхностное упрочнение тонкостенной втулки реализовано с помощью двух выбранных методов упрочнения (рис. 3, 4). После испытаний по определению микротвердости на приборе ПМТ-3М провели анализ параметров микротвердости поверх-

ностного слоя тонкостенных ремонтных втулок. Лучшие результаты оказались у нитрида титана (табл. 1). Структура поверхности втулки, упрочненной TiN, показана на рисунке 5.

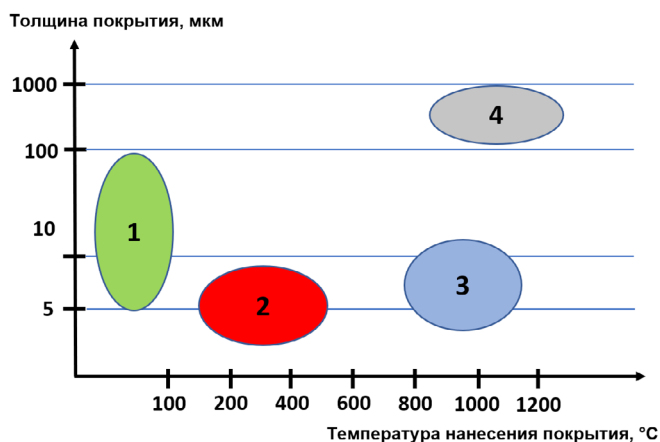


Рис. 2. Толщина покрытий в зависимости от методов нанесения:

- 1 – электролитическое хромирование;
- 2 – физическое осаждение покрытий (PVD);
- 3 – химическое осаждение покрытий (CVD);
- 4 – химико-термическая обработка

Fig. 2. Thickness of coatings depending on methods of application:

- 1 – electrolytic chromium plating;
- 2 – physical vapor deposition of coatings (PVD);
- 3 – chemical vapor deposition of coatings (CVD);
- 4 – chemical heat treatment

Характеристики покрытий тонкостенных ремонтных втулок

Таблица 1

Characteristics of coatings of thin-walled repair bushings

Table 1

Метод упрочнения <i>Method of hardening</i>	Обозначение покрытия <i>Designation of the coating</i>	Толщина покрытия, мкм <i>Thickness of the coating, μm</i>	Микротвердость покрытия, МПа <i>Microhardness of a coating, MPa</i>
Электролитическое покрытие (хромирование твердое) <i>Electrolytic coating (hard chromium plating)</i>	ХТВ 21	21...30	11000...12000
Физическое осаждение покрытий (PVD) <i>Physical vapor deposition of coatings (PVD)</i>	TiN	4,2-4,9-5,2 (в трех точках) (in three points)	18900-19500-21700 (в трех точках) (in three points)

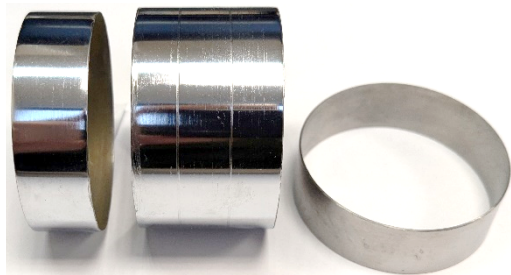


Рис. 3. Ремонтная тонкостенная втулка (ХТВ 21)

Fig. 3. Thin-walled repair bushing (Xtv 21)



Рис. 4. Ремонтная тонкостенная втулка (TiN)

Fig. 4. Thin-walled repair bushing (TiN)

Определение микротвердости поверхности TiN вдавливанием алмазного пирамидального индентора с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка изображено на рисунке 6.

Проведены замеры шероховатости упрочненных рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок с использованием профилометра MarSurf M400. Полученные данные (табл. 2) свидетельствуют

об улучшении чистоты поверхности на один класс при выбранных способах упрочнения рабочей поверхности втулки.

Профилограммы поверхностей (рис. 7) показывают, что нанесение упрочняющих покрытий позволило уменьшить шероховатости рабочих поверхностей втулки на 0,19 мкм по параметру Ra с хромо-вым покрытием и на 0,22 мкм с покрытием нитри-дом титана.

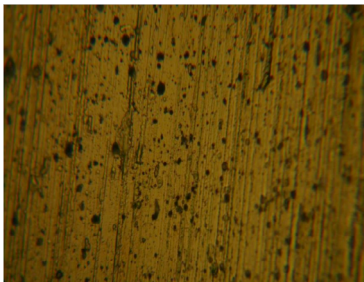


Рис. 5. Изображение поверхности ремонтной тонкостенной втулки (TiN). Увеличение – 400х

Fig. 5. Surface image of thin-walled repair bushing (TiN). Magnification – 400x

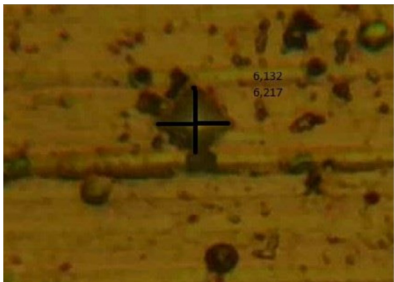


Рис. 6. След индентора на поверхности Ti N. Увеличение – 800х

Fig. 6. Indenter trace on the TiN surface. Magnification – 800x

Шероховатость рабочих поверхностей втулок

Таблица 2

Roughness of the working surfaces of bushings

Table 2

Метод упрочнения <i>Hardening method</i>	Обозначение покрытия <i>Designation of the coating</i>	Шероховатость рабочей поверхности заготовки, Ra_{cp} <i>Roughness of the working surface of a workpiece, Ra_{cp}</i>	Шероховатость рабочей поверхности детали, Ra_{cp} <i>Roughness of the working surface of a part, Ra_{cp}</i>
Электролитическое покрытие (хромирование твердое) <i>Electrolytic plating (hard chromium plating)</i>	ХТВ 21	0,47	0,28
Физическое осаждение покрытий (PVD) <i>Physical vapor deposition of coatings (PVD)</i>	TiN	0,47	0,25

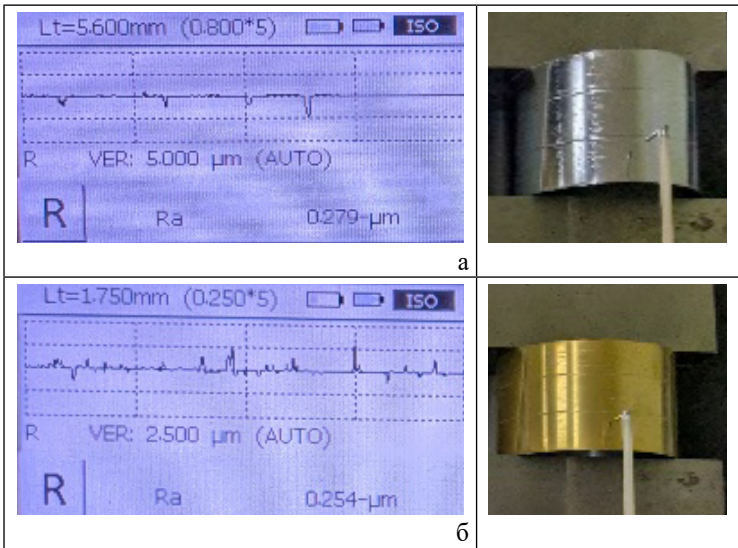


Рис. 7. Измерение шероховатости и профилограмма поверхности при твердом хромировании (а) и PVD (б)

Fig. 7. Roughness measuring and a surface profile diagram for hard chrome plating (a) and PVD (b)

Результаты измерений позволяют сделать вывод о том, что при изготовлении заготовок тонкостенных ремонтных втулок можно снизить требования к чистоте рабочей поверхности до 7 класса.

Выводы

1. Микротвердость поверхностного слоя втулки в уплотнительном соединении подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин должна превышать микротвердость кварцевого абразива (11000 МПа), а по возможности – оксида алюминия (21 000 МПа).

2. Для поверхностного упрочнения втулок с толщиной стенки 0,25...0,8 мм выбраны два метода низкотемпературного упрочнения поверхности: электролитическое покрытие на основе хрома

и физическое осаждение покрытий (PVD) нитридом титана.

3. Метод электролитического упрочнения поверхности позволил получить на тонкостенной втулке покрытие на основе хрома Хтв 21 толщиной 21...30 мкм и микротвердостью 11000...12000 МПа. Полученное физическим осаждением покрытие из нитрида титана TiN имеет толщину 4,2...5,2 мкм и микротвердость 18900...21700 МПа. Выбранные способы упрочнения рабочей поверхности втулки улучшают чистоту поверхности на один класс.

4. Применение упрочненной выбранными методами тонкостенной втулки позволит повысить работоспособность уплотнительного соединения подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин, работающих в пылевом облаке.

Список источников

1. 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. Т. 102, № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG
2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. и др. Оценка и анализ внутренних потерь при производстве продукции на машиностроительных предприятиях // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 5. С. 421-426. EDN: PYHKRC
3. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Гринченко Л.А. и др. Исследование влияния параметров макрогеометрии на герметичность соединений вала с манжетой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 6. С. 40-47. <https://doi.org/10.31857/S0235711923060111>
4. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. и др. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Белов М.И., Ерохин М.Н., Мельников О.М. Оценка давления уплотнения на вал // Агроинженерия. 2020. № 2 (96). С. 29-33. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением упрочненной ремонтной детали // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 9. С. 13-17. EDN: LRSMGN
7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. и др. Расчет и выбор посадок с натягом для восстановления поверхности вала под манжету запрессовкой тонкостенных втулок // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 12. С. 990-994. EDN: HWTEJU
8. Мельников П.О. Повышение ресурса уплотнительных устройств валов сельскохозяйственной техники // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов: Сборник статей Московской Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, доктора технических наук, профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19-20 декабря 2023 г. М.: Российский

References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z. et al. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5m principle. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(8):701-704. (In Russ.)
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Yu.G. et al. Assessment and analysis of internal losses in the manufacturing of products at machine-building enterprises. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(5):421-426. (In Russ.)
3. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Grinchenko L.A. et al. Study of the influence of macrogeometry parameters on the tightness of shaft-seal joints. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2023;6:40-47. <https://doi.org/10.31857/S0235711923060111> (In Russ.)
4. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Skorodov D.M., Belov M.I. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Belov M.I., Yerokhin M.N., Melnikov O.M. Evaluation of seal pressure on the shaft. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2020;2:29-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft with use of strengthened repair part *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2020;9:13-17. (In Russ.)
7. Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Vergazova Yu.G. et al. Calculation and selection of interference fits for restoring the shaft surface under the sealing ring by pressing thin-walled bushings. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;102(12):990-994. (In Russ.)
8. Melnikov P.O. Increasing the service life of sealing assemblies of agricultural machinery shafts. *Reinzhiniring i tsifrovaya transformatsiya ekspluatatsii transportno-tekhnologicheskikh mashin i robototekhnicheskikh kompleksov*: Proceedings of the Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists (Moscow, December 19-20, 2023), dedicated to the 100th anniversary of Prof. Nikolai Telnov, Doctor of Engineering, Veteran of the Great Patriotic War, Honored Scientist and Technician, Honored Inventor of the Russian Federation. M.: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2024. Pp. 245-249.

государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. С. 245-249. EDN: JFWBOM

9. Лапаев А.В., Мельников О.М. Методика расчета толщины ремонтной тонкостенной втулки для восстановления оптимального натяга в соединении «вал-манжета» // Техника и оборудование для села. 2025. № 1 (331). С. 31-34. EDN: LUBFOR

10. Ерохин М.Н., Чупяттов Н.Н. Повышение работоспособности гидравлических систем с применением CVD-метода металлоорганических соединений // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 3 (59). С. 39-41. EDN: TEFXML

11. Мельников О.М. Увеличение работоспособности соединений «вал-манжета» // Сборник статей по итогам II Международной научно-практической конференции «ГОРЯЧКИНСКИЕ ЧТЕНИЯ», посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 г. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. С. 346-349. EDN: RIBRFV

Информация об авторах

¹Лапаев Андрей Валентинович, преподаватель, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127994, Российская Федерация, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., 1; a9162968177@yandex.ru[✉]; SPIN-код: 3820-5721, AuthorID: 1112306

²Мельников Олег Михайлович, канд. техн. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643; Researcher ID: AAE-5857-2022; SPIN-код: 3684-2856, AuthorID: 770153

Статья поступила 05.09.2024, после рецензирования и доработки 12.03.2025; принята к публикации 14.03.2025

9. Lapaev A.V., Melnikov O.M. Method for calculating the thickness of a thin-walled repair bushing to restore optimal tension in the shaft-seal connection. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;1:31-34. (In Russ.).

10. Yerokhin M.N., Chupyatov N.N. Improving efficiency of hydraulic systems using CVD-method of organometallic compounds. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2013;3:39-41. (In Russ.).

11. Melnikov O.M. Increasing the serviceability of the “shaft-seal” joints. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Goryachkinskie Chteniya”, dedicated to the 150th anniversary of Academician V.P. Goryachkin, Moscow, April 18, 2018. M.: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2019. Pp. 346-349.

Author Information

Andrey V. Lapaev¹, Lecturer; Moscow State Technological University «STANKIN»; 127994, Russia, Moscow, Vadkovsky Side-Str., 1; a9162968177@yandex.ru

Oleg M. Melnikov², CSc (Eng); Associate Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str, 49; melnikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; Scopus Author ID: 57209744643; Researcher ID: AAE-5857-2022

Received 05.09.2024; Revised 12.03.2025; Accepted 14.03.2025