

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793:62-772.2:62-762.84

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-84-92>

Ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения ресурса уплотнительных соединений валов

*А.В. Лапаев¹, О.М. Мельников^{2✉}, Н.В. Серов³, А.Г. Гамидов⁴, А.В. Серов⁵*¹ МГТУ «СТАНКИН»; г. Москва, Россия^{2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия⁵ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); г. Москва, Россия¹ a9162968177@yandex.ru² melnikov@rgau-msha.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>³ n.sarov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>⁴ gamidov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>⁵ av_sarov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>

Аннотация. При капитальном ремонте энергонасыщенных тракторов около 70% валов ответственных узлов требуют восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями. Для предотвращения длительных простоев техники, вызванных неисправностями уплотнительных соединений валов, можно использовать ремонтный комплект (аптечку). Установка тонкостенной ремонтной втулки является быстрым, эффективным и экономически целесообразным способом восстановления герметичности уплотнительных соединений. Цель исследований – разработать ремонтный комплект для восстановления герметичности уплотнительных соединений, в состав которого входят новая манжета и упрочненная тонкостенная ремонтная втулка (ТРВ). Тонкостенная ремонтная втулка толщиной 0,25...0,35 мм изготовлена из стали AISI 321 с упрочнением TiN до микротвердости 18900...21700 МПа. Износостойкость соединений «Вал-манжета» с использованием предлагаемой ТРВ и втулки из стали 45 (эталон) исследовали на изготовленном стенде в течение 32 ч с добавлением в смазку узла 2% абразива. Установили, что титанирование поверхности втулок позволило увеличить их износостойкость в сравнении с заводскими валами в 10 раз и ресурс соединения – на 22%. Характеристики поверхности предлагаемых ТРВ соответствуют конструктивным параметрам, определяющим долговечность уплотнительных узлов валов (ГОСТ 8752-79). Тонкостенная ремонтная втулка позволяет восстановить работоспособность соединения в минимальные сроки (20-30 мин) даже в полевых условиях. Стоимость предлагаемой тонкостенной ремонтной втулки в 16 раз дешевле стоимости ТРВ иностранных производителей. Результаты исследований подтверждают целесообразность применения ремонтного комплекта (аптечки), включающего в себя упрочненную TiN тонкостенную ремонтную втулку (ТРВ), для восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями. Применение отечественных ТРВ позволит снизить зависимость от импортных комплектующих при восстановлении герметичности соединения «Вал-манжета».

Ключевые слова: вал-манжета; восстановление герметичности; долговечность уплотнительных узлов; тонкостенная ремонтная втулка; износ; износостойкость; ремонтный комплект

Для цитирования: Лапаев А.В., Мельников О.М., Серов Н.В., Гамидов А.Г., Серов А.В. Ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения ресурса уплотнительных соединений валов // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 84-92. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-84-92>

ORIGINAL ARTICLE

Repair kit for restoring sealing integrity and increasing the service life of shaft seal assemblies

A.V. Lapaev¹, O.M. Melnikov²✉, N.V. Serov³, A.G. Gamidov⁴, A.V. Serov⁵

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”; Moscow, Russia

^{2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

⁵ Bauman Moscow State Technical University (National Research University); Moscow, Russia

¹ a9162968177@yandex.ru

² melnikov@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>

³ n.serov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>

⁴ gamidov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>

⁵ av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>

Abstract. During the overhaul of high-horsepower tractors, about 70% of shafts in critical assemblies require restoration of working surfaces in the contact zone with seals. To prevent prolonged downtime of machinery caused by failures of shaft seal assemblies, a first-aid repair kit can be used. Installation of a thin-walled repair sleeve is a fast, effective, and economically feasible method of restoring sealing integrity. The research aimed to develop a repair kit for restoring sealing integrity, which includes a new sealing lip and a hardened thin-walled repair sleeve (TWRS). The thin-walled repair sleeve with a thickness of 0.25 to 0.35 mm is made of AISI 321 steel hardened with TiN to a microhardness of 18,900 to 21,700 MPa. The wear resistance of the “Shaft-Seal” assemblies using the proposed TWRS and a sleeve made of 45 steel (reference) was studied on a manufactured test bench for 32 hours with the addition of 2% abrasive to the assembly lubricant. It was found that titanium coating of the sleeve surfaces made it possible to increase their wear resistance by 10 times compared to factory shafts and the assembly service life by 22%. The surface characteristics of the proposed TWRS correspond to the design parameters determining the durability of shaft sealing units (GOST 8752-79). The thin-walled repair sleeve restores the operability of the assembly in minimum time (20-30 min) even in field conditions. The cost of the proposed thin-walled repair sleeve is 16 times lower than the cost of TWRS from foreign manufacturers. The research results confirm the feasibility of using a first-aid repair kit, including a TiN-hardened thin-walled repair sleeve (TWRS), for restoring working surfaces in the contact zone with seals. The use of domestically produced TWRS will reduce dependence on imported components when restoring the sealing integrity of the “Shaft-Seal” assembly.

Keywords: “shaft-seal” assembly; sealing integrity restoration; durability of sealing units; thin-walled repair sleeve; wear; wear resistance; repair kit

For citation: Lapaev A.V., Melnikov O.M., Serov N.V., Gamidov A.G., Serov A.V. Repair kit for restoring sealing integrity and increasing the service life of shaft seal assemblies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):84-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-84-92>

Введение

Качественные показатели работы отечественного агропромышленного комплекса зависят от парка техники. В настоящее время в АПК 59,6% тракторов, 45,3% зерноуборочных и 44,3% кормоуборочных комбайнов находятся в эксплуатации в течение более 10 лет [1]. Эксплуатация устаревших машин сопровождается простоями по причине аварийных отказов (43% случаев) и недостатка запасных частей (20...21%) [2, 3]. В большинстве регионов России сервисные бригады преодолевают в среднем 200 км до места ремонта. В ожидании

устранения простоя техники без разборки основных узлов¹ проходят сутки, а с необходимостью разборки – до двух суток [4]. Один час простоя комбайна в зависимости от его производительности обходится хозяйству в 10...15 тыс. руб. [2]. При средней наработке комбайна 14 ч за смену потери хозяйства от простоев могут составить от 140 до 210 тыс. руб. в день.

Традиционные методы ремонта с заменой вышедших из строя деталей теряют свою актуальность в связи с дефицитом запасных частей для зарубежной и отечественной техники (до 40% деталей

¹ Лапаев А.В. Восстановление соединений «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2026. 137 с. EDN: AAHDNP

в российской технике – импортные). Использование ремонтных комплектов взамен деталей позволяет повысить эффективность ремонта почти на 46% [3]. Использование ремонтных комплектов способствует увеличению общего ресурса машины до предельного состояния, снижению удельного расхода запасных частей и сокращению времени нахождения техники в ремонте.

Одной из причин уменьшения срока службы машин является потеря герметичности уплотнительных соединений вследствие износа. Утечки масла через уплотнения в энергонасыщенных тракторах составляют 23...28%, а в гидроагрегатах – до 44% от общего числа отказов [5]. Основной причиной износа деталей, эксплуатирующихся в условиях запыленности, является попадание абразива в зону трения² [6]. Одним из путей уменьшения износа вала является упрочнение поверхности, контактирующей с манжетой. Альтернативным, быстрым и экономически выгодным решением является установка упрочненных тонкостенных ремонтных втулок ТРВ (рис. 1).

Тонкостенные ремонтные втулки иностранных производителей SKF (Швеция), Dichtomatik (Германия) и др., установленные на изношенные валы, лучшим образом зарекомендовали себя при устранении утечек уплотняемой среды в соединении

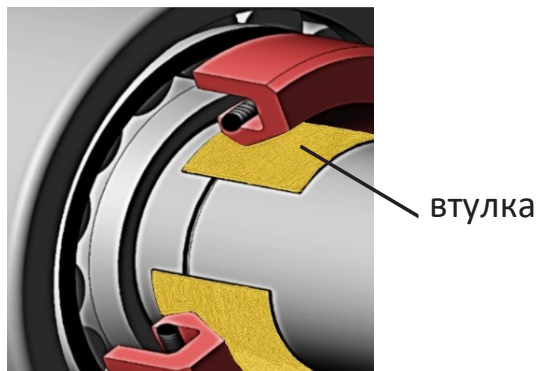


Рис. 1. Восстановленный уплотнительный узел

Fig. 1. Restored sealing assembly

«Вал-манжета». Однако использование втулок от данных производителей по стоимости сравнимо с заменой вала. Более того, в связи с введением санкций поставки от данных компаний прекращены. Следовательно, разработка ремонтных комплектов для восстановления уплотнительных соединений с применением тонкостенных втулок обеспечит импортозамещение запасных частей.

Цель исследований: разработать ремонтный комплект для восстановления герметичности и повышения износостойкости соединения «Вал-манжета».

Материалы и методы

Определяли износостойкость двух трибосоединений: в первом с манжетой контактировала втулка из стали 45 (эталон), распространенной для изготовления валов сельскохозяйственных машин; во-втором между манжетой и втулкой установили тонкостенную втулку из стали AISI 321, упрочненную TiN методом PVD (рис. 2, табл. 1) [6]. При необходимости фиксации втулки на валу допускается применение клеевых композиций.

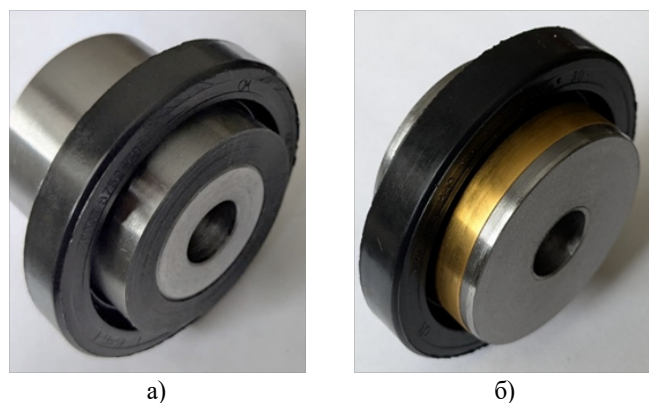


Рис. 2. Образцы для испытаний:

а) манжета и втулка из стали 45; б) манжета и тонкостенная втулка, упрочненная TiN

Fig. 2. Test specimens:

a) sealing lip and sleeve made of 45 steel; b) sealing lip and thin-walled sleeve hardened with TiN

Параметры поверхности валов и ТРВ

Таблица 1

Surface parameters of shafts and TWRS

Table 1

Деталь/Материал/Метод упрочнения	Обозначение покрытия	Толщина покрытия, мкм	Шероховатость рабочей поверхности Ra, мкм	Микротвердость, МПа
Вал/Сталь 45 (эталон)	нет	нет	0,16...0,63	7000...8000
ТРВ/Сталь AISI 321/Физическое осаждение PVD	TiN	4,2...5,2	0,18...0,27	18900...21700

² ООО «КЗ «Ростсельмаш»». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1744871554&tld=ru&lang=ru&name=HowToSelect-Havester-Rev.pdf&text> (дата обращения: 15.04.2025).

Определяли износостойкость соединений «Вал-манжета» 5 образцов на специально изготовленном стенде (рис. 3) с возможностью испытаний одновременно двух соединений. Стенд состоит из асинхронного электродвигателя¹ с регулятором частоты вращения от 300 до 1350 мин⁻¹, рабочей камеры (рис. 3). Вращение от двигателя к валу камеры

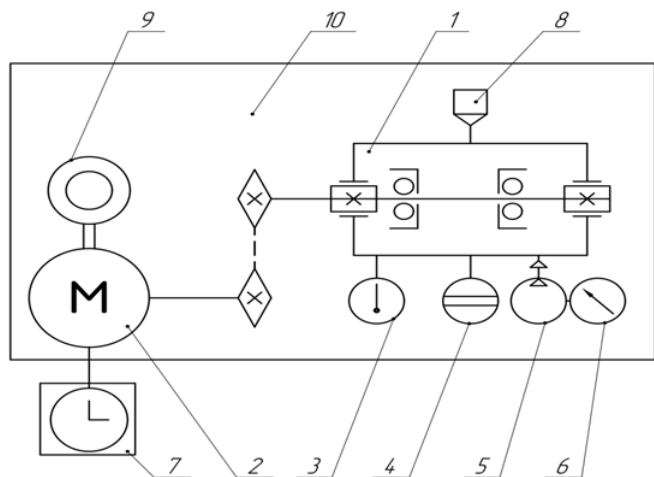


Рис. 3. Схема испытательного стенда:

- 1 – рабочая камера; 2 – двигатель; 3 – термометр;
4 – указатель уровня масла; 5 – компрессор;
6 – манометр; 7 – часы; 8 – заливная горловина;
9 – тахометр; 10 – рама

Fig. 3. Diagram of the test bench:

- 1 – working chamber; 2 – motor; 3 – thermometer;
4 – oil level indicator; 5 – compressor; 6 – pressure gauge;
7 – clock; 8 – filler neck; 9 – tachometer; 10 – frame

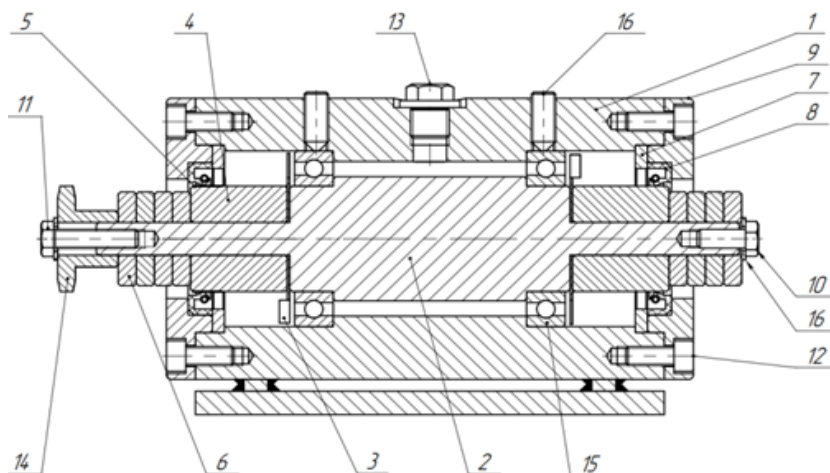


Рис. 4. Рабочая камера:

- 1 – корпус; 2 – вал; 3 – крыльчатка; 4 – втулка; 5 – тонкостенная втулка;
6 – пакет установочных шайб; 7 – упорная втулка; 8 – уплотнение; 9 – крышка; 10, 11 – крепежные винты;
12 – болт; 13 – заливная горловина; 14 – звездочка; 15 – подшипник; 16 – стопорная шайба

Fig. 4. Working chamber:

- 1 – housing; 2 – shaft; 3 – impeller; 4 – bushing; 5 – thin-walled sleeve; 6 – set of adjusting washers; 7 – thrust bushing;
8 – seal; 9 – cover; 10, 11 – mounting screws; 12 – bolt; 13 – filler neck; 14 – sprocket; 15 – bearing; 16 – lock washer

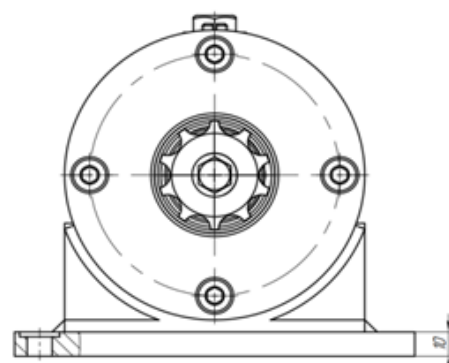
передается цепной передачей. Давление в камере повышается компрессором.

В корпусе камеры (рис. 4) установлен вал на двух подшипниках. На вал устанавливаем испытываемые втулки. Установочные шайбы позволяют крепить на вал втулки разной длины и перемещать их вдоль вала. Для разбрызгивания смазки на вал установлены крыльчатки³.

Сельскохозяйственная техника в течение основного времени работает в пылевом облаке. При увеличении содержания в смазке абразива от 0 до 2% скорость износа вырастает в 30 раз. Годовая загрузка тракторов в АПК в среднем по РФ составляют 940 ч. Для стендовых испытаний добавили в смазку 2% абразива, включающего в себя 87% кварцевого песка с микротвердостью 10500...11300 МПа и 13% оксида алюминия с микротвердостью 21000 МПа. Длительность испытаний установили в 30 раз меньше наработки (32 ч).

При испытаниях сравнивали интенсивность изнашивания серийных (эталонных) поверхностей соединений и соединений с ТРВ в идентичных условиях.

Испытания проводили в два этапа. На первом этапе детали соединения прирабатываются при частоте вращения вала 300 мин⁻¹ в течение 120 мин до стабилизации сил трения и температуры в зоне скольжения. Второй этап (основной) длится не менее 32 ч или до износа поверхности втулок на глубину 0,25 мм, равную толщине тонкостенной ремонтной втулки. Изнашивание происходит при частоте



³ Лапаев А.В. Восстановление соединений «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2026. 137 с. EDN: AAHDNP.

Характеристики измерительных приборов

Таблица 2

Characteristics of measuring instruments

Table 2

Прибор	Измеряемые параметры	Диапазон измерений	Погрешность
Прибор для измерений шероховатости и контура поверхности MarSurf LD120	Микрорельеф рабочей поверхности втулки	от 0,1 до 120 мкм	2%
Профилометр MarSurf M400	Ra , $Rmax$ рабочей поверхности втулки	от 0,007 до 10 мкм	3%
Профильный измерительный проектор HELIOS350-H	$D_{вн}$ манжеты	Длина: 0...250 мм Угол: 0...360°	$\pm 3'$

вращения вала рабочей камеры 600...1350 мин⁻¹ в режиме «Работа – остановка – работа» и давлении внутри камеры 0,05...0,15 МПа.

При подготовке к испытаниям проводили осмотр деталей на отсутствие повреждений сопрягаемых поверхностей манжет и втулок. Измерение профиля поверхности втулок проводили на приборе MarSurf LD120. Внутренний диаметр манжет измеряли с помощью HELIOS350-H. Шероховатость поверхности втулок определяли на профилометре MarSurf M400 (табл. 2).

По профилограммам определяли износ после приработки ($W_{п}$) и основного этапа испытаний ($W_{и}$) в течение 9, 18 и 32 ч работы стенда. Для этого частично разбирали рабочую камеру и снимали втулки и уплотнения, промывали их, сушили и производили замеры внутренних диаметров манжет и рабочих поверхностей втулок. Средний износ втулок определяли как среднее арифметическое по результатам замеров с 8 равноотстоящих по окружности участков (рис. 5).

Износ на участке профилографирования W_i определяли по формуле:

$$W_i = KW, \quad (1)$$

где K – коэффициент пропорциональности; W – глубина канавки (рис. 6), мкм.

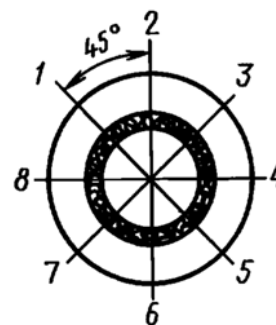


Рис. 5. Разметка втулок на участки для профилографирования

Fig. 5. Marking sleeves into sections for profilographing

$$K = \frac{R_{max}}{(H_{max} + H_{min})}, \quad (2)$$

где R_{max} , H_{max} , H_{min} – наибольшая высота неровностей, наибольшая высота выступа, наибольшая глубина впадины профиля, мкм (измеряются по профилограмме).

Износ втулок $W_{ср.}$, мкм, определяли как среднее арифметическое по восьми участкам:

$$W_{ср.} = \frac{\sum_{i=1}^8 W_i}{8}. \quad (3)$$

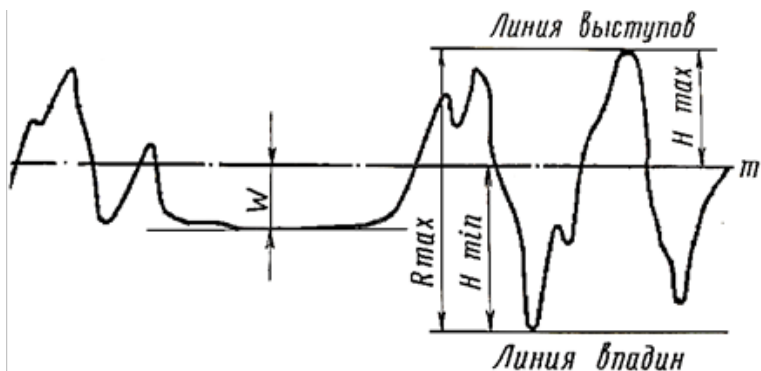


Рис. 6. Рельеф поверхности втулки с износом

Fig. 6. Surface topography of a worn sleeve

⁴ Лапаев А.В. Восстановление соединений «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2026. 137 с. EDN: AAHDNP.

По результатам износа деталей соединения строили графики.

Результаты и их обсуждение

Согласно результатам ранее проведенных исследований⁴ уровень упрочнения поверхности одной из деталей в соединениях «Вал-втулка» должен составлять не менее 15100 МПа.

Условия эксплуатации соединения «Вал-втулка», необходимые геометрические параметры, качество и твердость рабочей поверхности обуславливают сочетание следующих показателей тонкостенной ремонтной втулки: микротвердость >15100 МПа (по возможности > 21000 МПа); коррозионная стойкость; шероховатость поверхности $Ra = 0,16 \dots 0,63$ (ГОСТ 8752-79) и низкий коэффициент трения.

Процессы упрочнения должны сохранить форму втулки (исключить коробление детали),

шероховатость поверхности и исключить значительное увеличение толщины втулки.

Втулки изготовили толщиной 0,25...0,35 мм из нержавеющей стали AISI 321 для обеспечения коррозионной стойкости и упрочнили TiN методом физического осаждения из паровой фазы при температуре процесса 200...400°C для придания износостойкости рабочей поверхности втулок.

Результаты интенсивности изнашивания показали уменьшение износа более чем на 20% у трибосоединений с ТРВ, упрочненных TiN, относительно эталонных образцов. При этом износ ТРВ почти в 10 раз меньше износа эталонных поверхностей (рис. 7-9).

В целях исключения простоев техники, вызванных неисправностями в соединении «Вал-манжета», для сельскохозяйственных предприятий предлагается два варианта: изготовление ТРВ в сервисных центрах или в ремонтных мастерских;

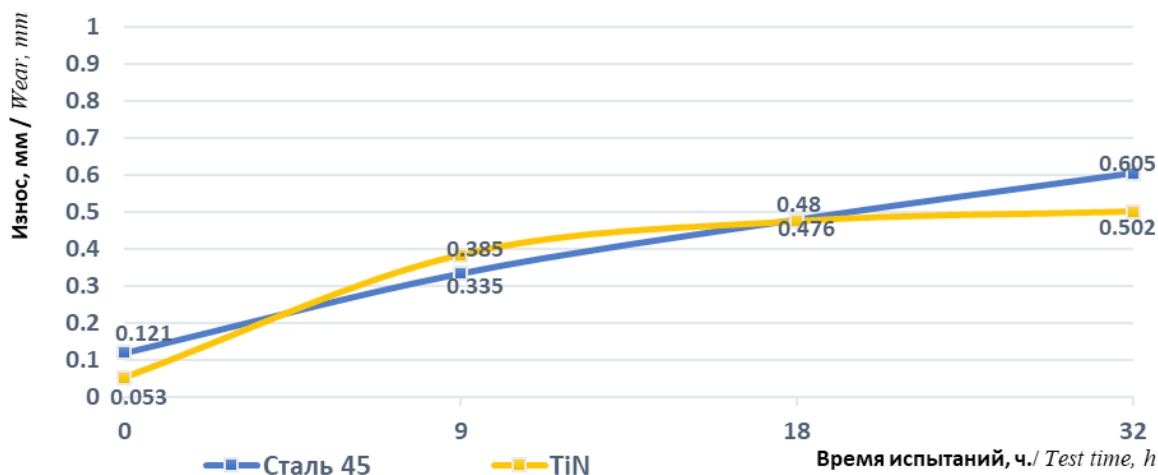


Рис. 7. Износ манжет

Fig. 7. Wear of sealing lips

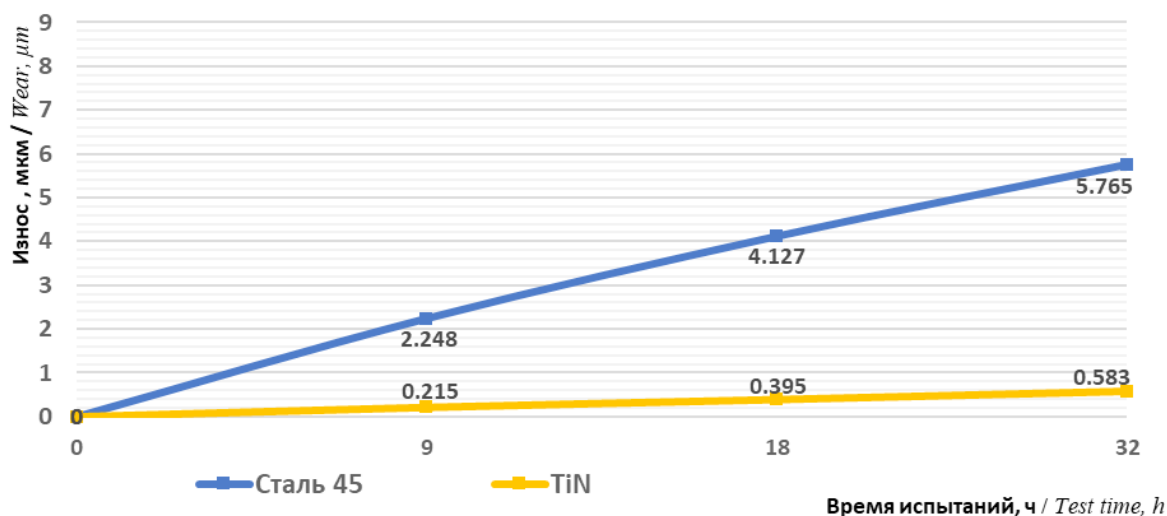


Рис. 8. Износ втулок

Fig. 7. Wear of sealing lips

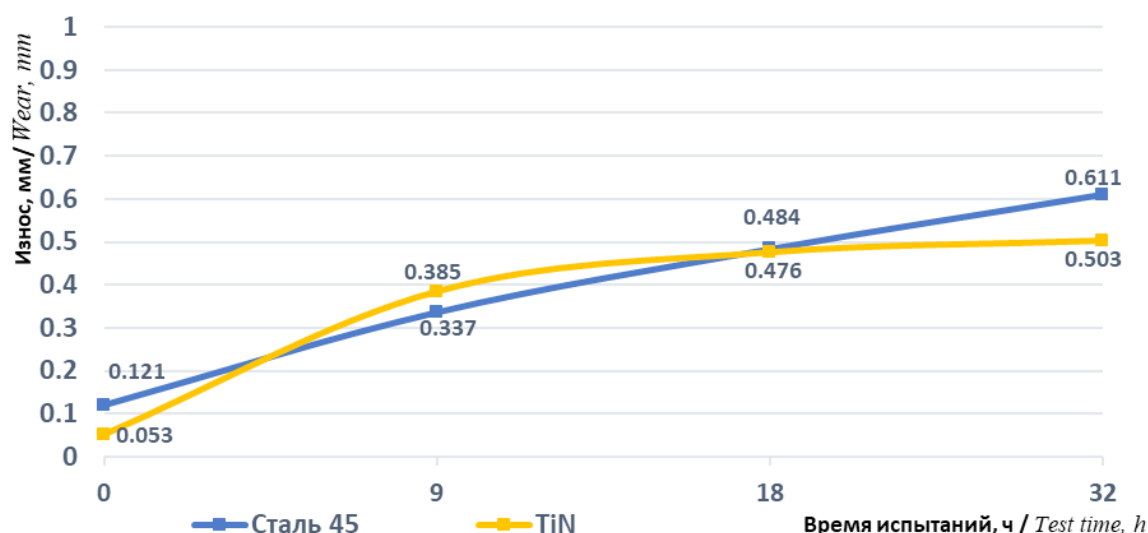


Рис. 9. Износ соединения «Вал-манжета»

Fig. 9. Wear of the “Shaft-Seal” assembly

использование готовых ремонтных комплектов (аптечек) (рис. 10).

При восстановлении герметичности соединения необходимо старую манжету заменить на новую. Предварительно следует очистить поверхность вала и установить на вал в зону его контакта с уплотнением тонкостенную втулку. Для фиксации ТРВ на валу предлагается использовать переходные посадки с клеевыми композициями [7-10]. Это связано с тем, что отклонение размеров валов может превышать 0,180 мм (исследование «ФНАЦ ВИМ»)⁵. При недостаточной фиксации

втулки на валу за счет посадки на внутреннюю поверхность втулки и поверхность вала после их обезжиривания нужно нанести клей и установить втулку на вал, после чего собрать узел. Применение клеевых композиций позволит обеспечить надежное соединение и минимизировать влияние отклонений размера вала на эксплуатационные характеристики узла. Для фиксации втулки на валу выбран продукт «ФГУП НИИ полимеров». Данный клей отверждается при зазоре до 0,3 мм и имеет допустимые напряжения сдвига 1,5 МПа. Сила трения между манжетой и валом диаметром 45 мм достигает



Рис. 10. Состав ремонтного комплекта (аптечки):

1 – ТРВ; 2 – манжета; 3 – средство для очистки и обезжиривания; 4 – клеевая композиция; 5 – наждачная бумага; 6 – салфетки

Fig. 10. Contents of the first-aid repair kit:

1 – TWRS; 2 – sealing lip; 3 – cleaning and degreasing agent; 4 – adhesive composition; 5 – sandpaper; 6 – wipes

⁵Нестеркин Г.А. Нормированные требования к качеству манжет, валов и их соединений // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. г. Тула, 18-20 апреля 2023 г. Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 146-148. EDN: QPFKRS

60 Н [11]. При ширине втулки 15 мм напряжение на сдвиг в клеевом слое между валом и ремонтной втулкой составит 0,03 МПа, что в 50 раз меньше допускаемых напряжений.

Стоимость полученных образцов составила 530 руб., что в 16 раз дешевле стоимости втулок иностранных производителей.

Выводы

1. Применение упрочненных тонкостенных ремонтных втулок TiN позволяет обеспечить восстановление контактирующей поверхности валов до требований, установленных ГОСТ 8752-79;

износостойкость полученной поверхности превышает эталонную в 10 раз.

2. Разработанные ремонтные комплекты (аптечки) для восстановления герметичности соединения «Вал-манжета» позволяют восстановить работоспособность соединения в минимальные сроки (20-30 мин) даже в полевых условиях.

3. Стоимость полученных образцов (530 руб.) в 16 раз дешевле стоимости втулок иностранных производителей.

4. Использование тонкостенной ремонтной втулки при ремонте техники позволит снизить зависимость от импортных комплектующих.

Список источников

1. Лукиенко Л.В. Анализ отказов эксплуатируемой сельскохозяйственной техники российского производства // *Агропродовольственная экономика*. 2024. № 5. С. 7-11. EDN: FCXNKK
2. Павлов А.П., Перфилов А.С. Обоснование эффективности применения стратегии эксплуатационного резервирования методом использования ремонтных комплектов // *Автотранспортное предприятие*. 2011. № 12. С. 50-52. EDN: OJQESX
3. Павлов А.П., Перфилов А.С. Обеспечение повышения уровня технического состояния парка машин на основе использования ремонтных комплектов // *Автотранспортное предприятие*. 2012. № 1. С. 53-55. EDN: ONMRHL
4. Коняева Н.И., Коняев Н.В. Особенности ремонта сельскохозяйственной техники в современных условиях // *Современные материалы, техника и технологии*. 2022. № 6 (45). С. 125-130. EDN: VQNZDK
5. 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
6. 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>
7. Игнаткин И.Ю., Серов А.В., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов // *Вестник НГИЭИ*. 2021. № 5. С. 53-64. EDN: GUBFOE
8. Кононенко А.С., Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Восстановление шейки вала редуктора приклеиванием упрочненной втулки // *Клей. Герметики. Технологии*. 2021. № 8. С. 33-39. EDN: TTXMNN
9. 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
10. Игнаткин И.Ю., Дроздов А.В. Способ восстановления изношенной поверхности вала редуктора в соединении «вал-манжета» с применением ремонтной втулки и полимерных материалов // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2019. № 6. С. 40-45. EDN: RLGQMV
11. 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>

References

1. Lukienko L.V. Analysis of failures Russian-made agricultural machinery in operation. *Agroprodovolstvennaya ekonomika*. 2024;5:7-11. (In Russ.)
2. Pavlov A.P., Perfilov A.S. Justification of the effectiveness of applying the operational redundancy strategy using the method of repair kits. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2011;12:50-52. (In Russ.)
3. Pavlov A.P., Perfilov A.S. Ensuring improvement of the technical condition level of the machine fleet based on the use of repair kits. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2012;1:53-55. (In Russ.)
4. Konyaeva N.I., Konyaev N.V. Features of agricultural repair techniques in modern conditions. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2022;6(45):125-130. (In Russ.)
5. 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(331):31-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-1-31-34>
6. 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>
7. Ignatkin I.Yu., Serov A.V., Drozdov A.V. Method for recovery of the reducer shaft using repair parts and polymer materials. *Vestnik NGIEI*. 2021;5:53-64. (In Russ.)
8. Kononenko A.S., Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft neck by gluing of hardened sleeve. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2021;8:33-39. (In Russ.)
9. 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.)
10. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Method of restoring the worn surface of a reduction gear shaft in a 'shaft-to-collar' connection using a repair bushing and polymeric materials. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2019;6:40-45. (In Russ.)
11. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu. et al. 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>

Информация об авторах

- ¹ **Лапаев Андрей Валентинович**, канд. техн. наук, доцент;
a9162968177@yandex.ru; SPIN-код: 3820-5721
- ² **Мельников Олег Михайлович**, канд. техн. наук, доцент;
melnikov@rgau-msha.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>; SPIN-код: 3684-2856
- ³ **Серов Никита Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент;
n.serov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>; SPIN-код: 3364-1840
- ⁴ **Гамидов Абдурахман Гаджиевич**, канд. техн. наук, доцент;
gamidov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>; SPIN-код: 7150-6492
- ⁵ **Серов Антон Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент;
av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>;
SPIN-код: 8269-4840
- ¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»; 127994, Российская Федерация, г. Москва, Вадковский переулок, 1
- ^{2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ⁵ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

Вклад авторов

Лапаев А.В. – проведение исследований, создание черновика рукописи;
Мельников О.М. – руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Серов Н.В. – ресурсы, формальный анализ;
Гамидов А.Г. – верификация данных;
Серов А.В. – визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 10.03.2026; после рецензирования и доработки 29.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

Author Information

- Andrey V. Lapaev**¹, CSc (Eng), Associate Professor;
a9162968177@yandex.ru
- Oleg M. Melnikov**², CSc (Eng), Associate Professor;
melnikov@rgau-msha.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0003-3202-8799>;
Scopus Author ID: 57209744643
- Nikita V. Serov**³, CSc (Eng), Associate Professor;
n.serov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-7676-4344>;
Scopus Author ID: 57226809065
- Abdurakhman G. Gamidov**⁴, CSc (Eng), Associate Professor;
gamidov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-4222-3726>;
Scopus Author ID: 57224404150
- Anton V. Serov**⁵, CSc (Eng), Associate Professor;
av_serov@vk.com; <https://orcid.org/0000-0001-6114-7354>
- ¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”; 127994, Russian Federation, Moscow, Vadkovsky Lane, 1
- ^{2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49
- ⁵ Bauman Moscow State Technical University (National Research University); 105005, Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5, Bld. 1

Author Contributions

Lapaev A.V. – investigation, writing – original draft;
Melnikov O.M. – research supervision, writing – review and editing of the manuscript;
Serov N.V. – resources, formal analysis;
Gamidov A.G. – data verification;
Serov A.V. – visualization.

Conflict of interests

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

Received 10.03.2026; Revised 29.06.2026; Accepted 03.07.2026