

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.923.74

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-70-75



Методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение» при ремонте

Леонов Олег Альбертович , д-р техн. наук, профессорoaleonov@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020**Шкаруба Нина Жоровна**, д-р техн. наук, профессорshkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019**Вергазова Юлия Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцентvergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022**Нестеркин Геннадий Алексеевич**

metr@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Надежность современных уплотнительных узлов сельскохозяйственной техники является недостаточной. Вследствие износа поверхности вала и манжеты при эксплуатации уменьшаются натяги в подвижном соединении, что приводит к началу утечек и отказу узла. Утечки технических жидкостей в агрегатах составляют 20...30% от общего числа отказов, в межремонтный период отказ уплотнений встречается в 1,5 раза чаще, чем у новой техники. Методика комплектования деталей соединений валов с манжетами позволит назначать рациональные ремонтные размеры валов и подбирать к ним манжеты. С целью её разработки рассмотрены основные направления обеспечения эксплуатационной надёжности соединений валов, в том числе прогрессивные способы восстановления поверхности вала. При разработке методики исследовались 100 изношенных первичных валов коробки передач двигателя ЯМЗ-239 и 100 новых манжет 1.2-52'72-8. Произведено измерение изношенной поверхности вала под манжету и внутренних диаметров отверстий манжет. Износ поверхности вала под манжету достигал 0,5 мм, а вероятность появления валов, имеющих износ более допустимого 51,7 мм, составила 33%. При сборке изношенных валов с новыми манжетами разброс натягов составлял от 1,7 до 3 мм. При этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, нарушена у 15% соединений. В соединениях новых манжет с валами, обработанными под ремонтный размер 51,4 мм, разброс натягов находился в диапазоне от 1,6 до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга нарушена у 20% соединений. По критерию сохранения наименьшего натяга в соединении апробирована методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение», включающая в себя расчет числа групп, назначение ремонтных размеров вала и подбор к ним диаметров манжет. В результате вероятность появления соединений с гарантированным натягом не менее 2 мкм составила 88%. Следовательно, предлагаемая методика комплектования валов и манжет позволяет обеспечить долговечность соединений «Вал-уплотнение» на уровне новых.

Ключевые слова: методика комплектования деталей соединений, ремонт, допуск, вал, манжета, надежность, долговечность, натяг

Формат цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Нестеркин Г.А. Методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение» при ремонте // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 70-75. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-70-75>.

© Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Нестеркин Г.А., 2023

ORIGINAL PAPER

Methodology of completing the parts of the “Shaft seal” connections during repair

Oleg A. Leonov , DSc (Eng), Professoroaleonov@rgau-msha.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020**Nina Zh. Shkaruba**, DSc (Eng), Professorshkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019

Yuliya G. Vergazova, CSc (Eng), Associate Professor

vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022

Gennady A. Nesterkin

metr@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The reliability of modern sealing units of agricultural machinery is insufficient. Due to surface wear of the shaft and the seal during operation, the tightness in the movable joint decreases. This condition leads to the onset of leaks and the assembly failure. Leaks of technical fluids in units account for 20 to 30% of the total number of failures; during the overhaul period, seal failures occur 1.5 times more often than in new equipment. The method of completing the parts of shaft connections with seals will be useful for assigning rational repair dimensions of the shafts and selecting suitable seals. For its development, the authors considered the main ways to ensure the operational reliability of shaft connections, including advanced methods for restoring the shaft surface. When developing the method, 100 worn input shafts of the YaMZ-239 engine gearbox and 100 new seals 1.2-52'72-8 were studied. Measurements were taken of the worn surface of the shaft under the seal and the inner diameters of the seal holes. The wear of the shaft surface under the seals reached 0.5 mm, and the probability of the shafts with wear exceeding the allowable 51.7 mm was 33%. When assembling worn shafts with new seals, the spread of interference ranged from 1.7 to 3 mm. At the same time, the limit of the least tightness, equal to 2 mm, was violated in 15% of the connections. In the connections of new seals with shafts machined to a repair size of 51.4 mm, the spread of interference ranged between 1.6 mm and 3 mm, while the limit of the least interference was violated in 20% of the connections. According to the criterion of maintaining the least tightness in the connection, the method of completing the parts of the “shaft-seal” connection was tested, including the calculation of the number of groups, the assignment of shaft repair dimensions and the selection of seal diameters. As a result, the probability of appearing connections with a guaranteed tightness of at least 2 microns was 88%, therefore, the proposed method of selecting shafts and seals makes it possible to make the durability of shaft-seal connections comparable to the new ones.

Keywords: method of completing connection parts, repair, tolerance, shaft, seal, reliability, durability, tightness

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Nesterkin G.A. Methodology of completing the parts of the “Shaft seal” connections during repair. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):70-75. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-70-75>.

Введение. На надежность сборочных единиц сельскохозяйственной техники существенное влияние оказывает долговечность работы уплотнительных устройств. Утечки масла в коробках передач, редукторах, двигателях и в других агрегатах составляют 20...30% от общего числа отказов, а в межремонтный период отказы уплотнений встречаются в 1,5 раза чаще, чем в доремонтный. При ремонте сельскохозяйственной техники все уплотнения подлежат замене, и 10...80% сопряженных с ними деталей валов требуют замены или восстановления¹.

При ремонте валы восстанавливаются под номинальный размер различными способами, в том числе с применением ремонтных втулок и полимерных материалов [1, 2]. Проводятся исследования по оценке показателей качества деталей и соединения [3, 4], контактного давления на поверхностях [5, 6], обеспечения работоспособности [7]. Применяется размерный анализ для расчета отклонений от соосности манжеты и вала в конкретных сборочных единицах [8]. Изучаются вопросы качества финишной обработки поверхности вала [9].

¹ Мельников О.М. Повышение работоспособности уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 161 с.

Наряду с проведением практических исследований изучаются вопросы математического обеспечения взаимодействия контактирующих поверхностей соединения «Вал-манжета» [10], но пока не разработана теория герметичности резиновых армированных манжет.

Наряду с параметрами износостойкости существенную роль в обеспечении надежности и долговечности работы соединений с натягом играют параметры точности – такие, как допуски размеров, отклонения и допуски посадки [11, 12]. Изучаются вопросы измерения натягов в процессе эксплуатации путем применения моделей параметрического отказа [13].

При назначении рациональных ремонтных размеров валов и подбора к ним манжет необходима методика комплектования деталей соединений.

Цель исследований: разработка методики комплектования деталей соединений валов с манжетами для обеспечения заданной долговечности.

Материалы и методы. В исследованиях применены положения теории точности, взаимозаменяемости, вероятности и математической статистики.

Объектом исследований являлся первичный вал коробки передач двигателя ЯМЗ. Предмет исследований – соединения «Вал-уплотнение», параметры точности которых представлены в таблице 1.

Таблица 1
Параметры точности валов и манжет 1.2-52×72-8
соединения «Вал-уплотнение»

Table 1
Accuracy parameters of shafts and cuffs 1.2-52×72-8
shaft-seal connections

Наименование измеряемого диаметра <i>Name of the measured diameter</i>	Номинальный размер с отклонениями, мм <i>Nominal size with deviations, mm</i>	Допуск, мм <i>Tolerance, mm</i>	Размер, предельно допустимый, без ремонта, мм <i>Limit of size without repair, mm</i>
Вал / Shaft	52 _{-0,12}	0,12	57,7
Отверстие манжеты <i>Hole of a rubber seal</i>	52 _{-2,0 -3,0}	1,0	*

*При ремонте все манжеты заменяются на новые.

Средства измерений внутреннего диаметра манжеты и посадочной поверхности под манжету на валу выбирались в соответствии с требованиями ГОСТ 8.051-81 «Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм».

Для измерения внутреннего диаметра манжеты использовалась оптическая измерительная система, собранная на базе инструментального микроскопа, дискретность отсчета 0,01 мм. Для измерения диаметра посадочной поверхности под манжету на первичном валу коробки передач двигателя ЯМЗ применялся индикатор цифровой часового типа, дискретность отсчета 0,001 мм, в сборе со специальным острым наконечником в стойке.

Результаты и их обсуждение. Долговечность соединения «Вал-уплотнение» обеспечивается заданными величинами натягов, получаемых при сборке. При эксплуатации происходит уменьшение натягов подвижного соединения ввиду износа поверхности вала и манжеты, что приводит к началу утечек и отказу соединения.

В коробке передач двигателя ЯМЗ допуск на наружный диаметр вала составляет 0,12 мм, а допуск отверстий манжет – 1 мм (табл. 1), поэтому до выведения следов износа можно обрабатывать валы с сохранением параметров точности и твердости (твердость поверхности вала HRC 30...50) на малую глубину до 0,5 мм путем финишного шлифования под ремонтный размер.

При ремонте вала необходимо не только вывести следы износа, но и учесть припуск на обработку. Это объясняется изнашиванием поверхности вала и значительным искажением его геометрической формы (рис. 1).

На основании данных рисунка 1 можно определить ремонтный размер вала, используя зависимость

$$d_{pp} = (d_n + es - e) - \frac{2 \cdot \beta \cdot U}{1 + \beta}, \quad (1)$$

где d_n – номинальный диаметр вала, мм; es – верхнее отклонение, мм; $\beta = U_{\max}/U_{\min}$ – коэффициент неравномерности износа; e – диаметральный припуск на отработку, мм; $U_{\max}$ и $U_{\min}$ – наибольший и наименьший износ на сторону; $U = U_{\max} + U_{\min}$ – диаметральный межремонтный износ вала, мм.

Валы, обработанные под ремонтный размер, рассчитанный по формуле (1), соединяют с новыми манжетами. При этом в полученных соединениях не будет обеспечен наименьший конструктивный натяг, необходимый для обеспечения долговечности соединения.

При единичном и мелкосерийном производстве обычно применяется сплошная дефектация валов, поэтому рекомендуется использовать методику комплектации соединений путем использования группы ремонтных размеров (ГР). Число ремонтных размеров в группе можно определить как

$$n = \frac{\omega_{\text{изн}}}{T_d + (m - ei)}, \quad (2)$$

где m – шаг между ремонтными размерами; ei – наименьшее отклонение вала, мм.

Для обеспечения равенства натягов нового и восстановленного соединения манжеты к валам ремонтных размеров должны подбираться по внутреннему диаметру (рис. 2). Верхние отклонения от номинального размера манжет, устанавливаемых на валы ремонтных размеров, определяем по формуле:

$$ES\phi_{\max} = ES_{\max} - (d_n - d_{pp}). \quad (3)$$

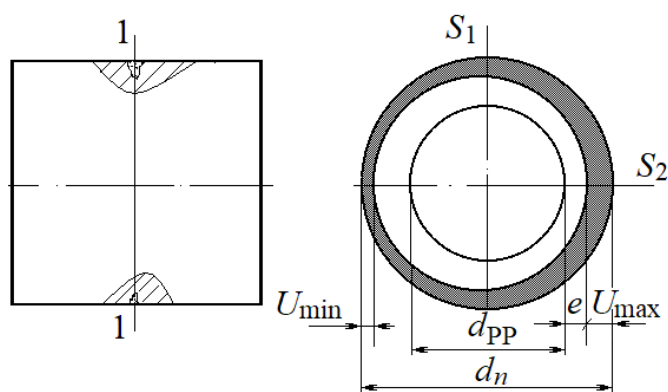


Рис. 1. Связь ремонтного размера вала с износом и припуском:

1-1 – измеряемое сечение; S_1, S_2 – измеряемые плоскости

Fig. 1. Relationship of the repair size of the shaft with wear and allowance:

1-1 – measured section; S_1, S_2 – measured planes

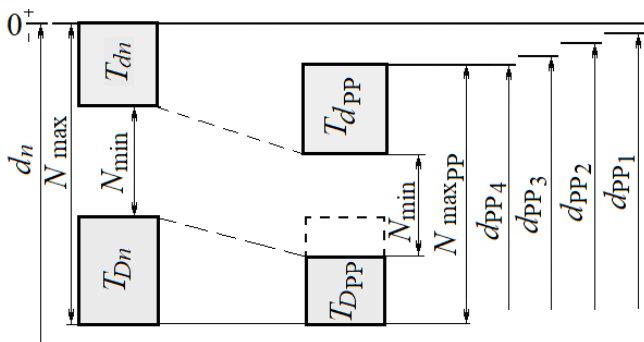


Рис. 2. Обоснование сортировки манжет по внутреннему диаметру при постановке на валы ремонтного размера (с целью сохранения наименьшего конструктивного натяга)

Fig. 2. Justification for sorting rubber seals by inner diameter when mounting on shafts of a repair size (to preserve the smallest structural tension)

Рассмотрим предлагаемую методику комплектования на следующем примере.

Для исследований были отобраны 100 изношенных первичных валов коробки передач двигателя ЯМЗ и 100 новых манжет 1.2-52'72-8. Произведено измерение изношенной поверхности вала под манжету и внутренних диаметров отверстий манжет (табл. 2, рис. 3, 4).

Из данных рисунка 3 следует, что распределение внутренних диаметров новых манжет находится в пределах допуска и все измеренные манжеты являются годными.

Из данных рисунка 4 следует, что износ поверхности вала под манжету достигает величины 0,5 мм, но большая часть распределена ближе к номинальному размеру. Вероятность появления валов, имеющих износ поверхности под манжету менее допустимого 57,7 мм (табл. 1), составила 33%. При сборке с новыми манжетами разброс натягов в пределах $\pm\sigma$ составит от 1,7 до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, будет нарушена у 15% соединений. Остальные 67% валов могут быть обработаны под ремонтный размер 51,4 мм, определенный по формуле (1), до выведения следов износа с учётом припуска

Параметры рассеяния диаметров изношенных валов и новых манжет

Таблица 2

Table 2

Parameters of diameter dispersion of worn shafts and new rubber seals

Параметры распределения <i>Distribution parameters</i>	Манжеты (новые) <i>Rubber seals (new)</i>	Валы (изношенные) <i>Shafts (worn out)</i>
Среднее арифметическое, мм <i>Arithmetic mean, mm</i>	49,5875	51,806
Среднее квадратическое отклонение, мм <i>Mean square deviation, mm</i>	0,177	0,109
Зона рассеяния, мм <i>Spread, mm</i>	1,060	0,655

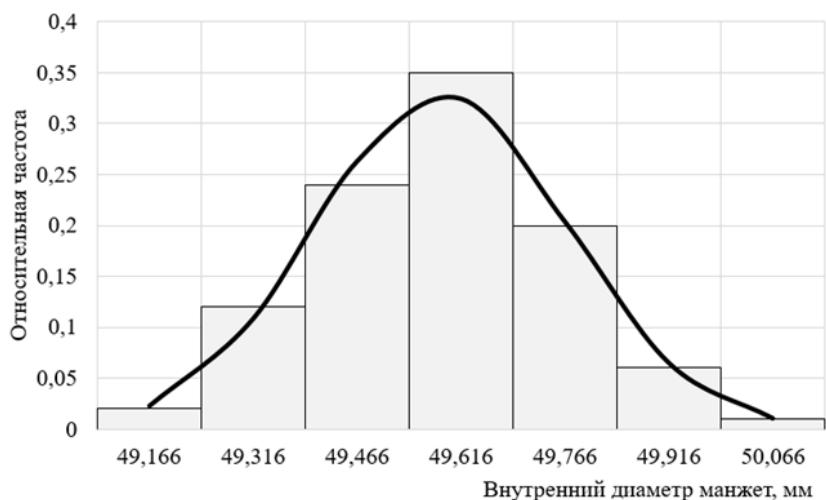


Рис. 3. Распределение внутренних диаметров новых манжет

Fig. 3. Distribution of internal diameters of new rubber seals

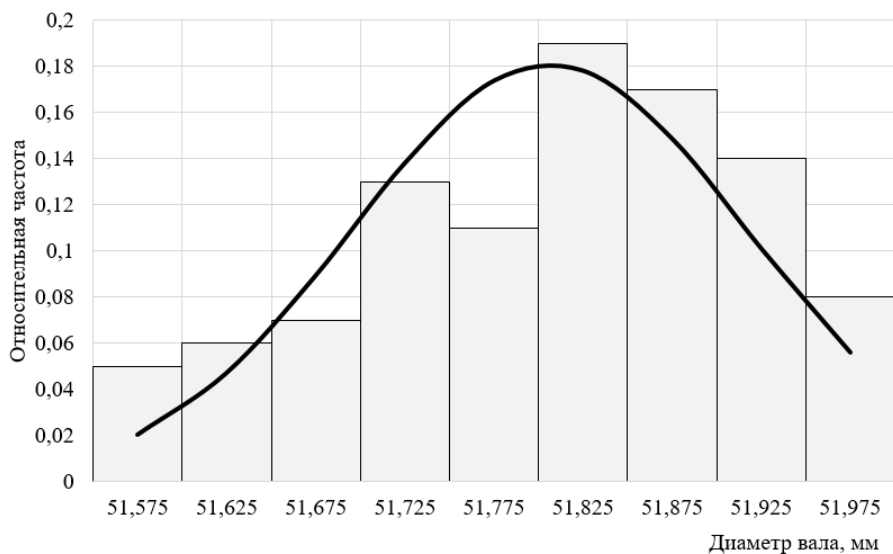


Рис. 4. Распределение изношенной поверхности вала под манжету

Fig. 4. Distribution of the worn surface of the shaft under the rubber seals

на обработку. В этом случае в соединениях новых манжет с валами, обработанными под ремонтный размер, разброс натягов в пределах $\pm\sigma$ составит от 1,6 до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, будет нарушена у 20% соединений.

Применим предлагаемую методику комплектации, для чего рассчитаем число ремонтных размеров валов в группе по формуле (2) и определим отклонения внутренних диаметров манжет по критерию сохранения наименьшего конструктивного натяга для каждого ремонтного размера. В результате расчета получим $n = 3,7$, поэтому примем $n = 4$ и составим комплектуючую таблицу 3.

С использованием характеристик полученных рассеяний (табл. 2) определены вероятности появления

валов и манжет в каждой размерной группе при комплектовании, рассчитаны вероятности появления соединений по каждой группе (табл. 4).

Из данных таблицы 4 следует, что при применении предлагаемой методики вероятность появления соединений с гарантированным натягом не менее 2 мкм составляет 88% (так, на 100% валов, обработанных под ремонтные размеры, хватает 88% манжет), что свидетельствует о незавершенной сборке.

Для повышения процента сборки соединений следует закупать на 12...15% больше манжет, чем обрабатываемых под ремонтный размер валов. Остальные манжеты (12%) могут быть собраны с новыми валами, которые заменяют выбракованные валы в процессе дефектации по другим причинам.

Таблица 3

Комплектовочная таблица для соединения «Вал-уплотнение»

Table 3

Assembly table for "shaft-rubber seal" connection

Ремонтный размер, мм / Repair size, mm		Маркировка Marking	Припуск на обработку Machining allowance	Размеры подбираемых манжет, мм Dimensions of the selected rubber seals, mm
при расчете по допуску when calculating the tolerance	при расчете по зоне рассеяния when calculating the spread			
51,8 _{-0,12}	51,8 _{-0,072}	1P	0,05	52 ^{-2,2} _{-3,0}
51,7 _{-0,12}	51,7 _{-0,072}	2P	0,05	52 ^{-2,3} _{-3,0}
51,6 _{-0,12}	51,6 _{-0,072}	3P	0,05	52 ^{-2,4} _{-3,0}
51,5 _{-0,12}	51,5 _{-0,072}	4P	0,05	52 ^{-2,5} _{-3,0}

Таблица 4

Вероятности появления валов и манжет, попадающих в ремонтную группу при комплектовании

Table 4

Probabilities of using shafts and seals that fall into the repair group when completing the units

Ремонтная группа Repair group	Диапазоны размеров валов, мм Ranges of shaft sizes falling into the repair group, mm	Вероятность, появления валов, мм Probability of using shafts, mm	Диапазоны размеров манжет, мм Size ranges of rubber seals, mm	Вероятность появления манжет, мм Probability of using rubber seals, mm
1P	51,85 и более	0,34	49,0...49,8	0,88
2P	51,85...51,75	0,35	49,0...49,7	0,73
3P	51,75...51,65	0,23	49,0...49,6	0,53
4P	51,65 и менее	0,07	49,0...49,5	0,31

Выводы

Разработанная методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение», включающая в себя расчёт числа групп, назначение ремонтных размеров вала и подбор манжет по критерию сохранения наи-

меньшего натяга в соединении, применима для восстановления всех соединений типа «Вал-уплотнение», где уплотнением является стандартная резиновая армированная манжета (ГОСТ 8752-79). Перед расчётом ремонтных размеров необходимо провести анализ величин износа валов.

Список использованных источников

1. 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
2. Игнаткин И.Ю., Серов А.В., Дроздов А.В. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов // Вестник НГИЭИ. 2021. № 5(120). С. 53-64. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-5-53-64>
3. Grün J., Gohs M., Bauer F. Multiscale structural mechanics of rotary shaft seals: numerical studies and visual experiments. *Lubricants*. 2023;11(6):234 <https://doi.org/10.3390/lubricants11060234>
4. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. 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/driveshaftseal10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Методика расчета контактного давления манжеты на вал // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 39-45. EDN: PLAAFT
7. Zhou Q., Li Sh., Zhang K., Qin K., Lv V., Sun W., Yuan T. Transitions of Wear Characteristics for Rubber/Steel Seal Pairs During the Abrasive Wear Process. *Tribology Letters*. 2021;69:101. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01480-4>
8. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Амелин С.С., Бодунов Д.М. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 6. С. 61-67. EDN: ITEXLG
9. Ягьяев Э.Э., Шрон Б.Л. Повышение надежности работы соединения «вал-манжета» при суперфинишировании с осцилляцией на поверхности вала // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2017. № 1(55). С. 48-53. EDN YPJNDF
10. Шрон Б.Л., Ягьяев Э.Э., Мевлют Ш.Т. Математическое обеспечение взаимодействия контактирующих поверхностей соединения «вал-манжета» // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2016. № 1(51). С. 123-127. EDN: WNGKZX
11. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Расчет посадок с натягом при комбинированном нагружении // Вестник машиностроения. 2021. № 3. С. 25-28. EDN: QUAQQG
12. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Хасьянова Д.У. Обоснование посадок соединений со шпонками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 6. С. 65-71. EDN: EITIEV
13. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Расчет допуска посадки по модели параметрического отказа соединения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 14-20. EDN: VILYGG

Вклад авторов

О.А. Леонов – руководство исследованием; формулирование основной концепции исследования и задач;
 Н.Ж. Шкаруба – разработка методологии исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
 Ю.Г. Вергазова – верификация данных; визуализация данных, разработка программного обеспечения;
 Г.А. Нестеркин – подготовка начального варианта текста, формирование выводов представления, описание результатов и формирование выводов исследования.

Конфликт интересов:

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

Статья поступила в редакцию 07.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 30.05.2023; принята к публикации 30.05.2023

References

1. Ignatkin I.Yu., Drozdov A.V. Renewal method of gearbox shaft with use of strengthened repair part. *Repair, Reconditioning, Modernization*. 2020;9:13-17. (In Rus.)
2. Ignatkin I.Yu., Serov A.V., Drozdov A.V. Method for recovery of the reduction gear shaft using repair parts and polymer materials. *Bulletin NGIEI*. 2021;5(120):53-64. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-5-53-64>
3. Grün J., Gohs M., Bauer F. Multiscale structural mechanics of rotary shaft seals: numerical studies and visual experiments. *Lubricants*. 2023;11(6):234. (In Rus.) <https://doi.org/10.3390/lubricants11060234>
4. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
5. Belov M.I., Erokhin M.N., Melnikov O.M. Evaluation of seal pressure on the shaft *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2020;2(96):29-33. (In Rus.) <https://doi.org/driveshaftseal10.26897/2687-1149-2020-2-29-33>
6. Erokhin M.N., Belov M.I., Melnikov O.M. Method of calculating the contact pressure of the seal on the shaft. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;11:39-45. (In Rus.)
7. Zhou Q., Li Sh., Zhang K., Qin K., Lv V., Sun W., Yuan T. Transitions of wear characteristics for rubber/steel seal pairs during the abrasive wear process. *Tribology Letters*. 2021;69:101. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01480-4>
8. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Amelin S.S., Bodunov D.M. Application of dimensional analysis for calculating the total misalignment between a seal and a shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;50(6):524-529. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1052618821060066>
9. Yagyaev E.E., Shron B.L. Improvement reliability of work of the “shaft-seal” connection for superfinishing from oscillations on the shaft surface. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2017;1(55):48-53. (In Rus.)
10. Shron B.L., Yagyaev E.E., Mevlyut Sh.T. Mathematical support of the “shaft-seal” contacting surfaces. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2016;1(51):123-127. (In Rus.)
11. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Calculation of interference fits under combined loading. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2021;3:25-28. (In Rus.)
12. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Khasyanova D.U. Determining the fits of keyed connections. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2022;6:65-71.
13. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Calculation of the fit tolerance by model parametric joint failure model. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;49(12):1027-1032. (In Rus.) <https://doi.org/10.3103/S1052618820120092>

Contribution of the authors

O.A. Leonov – research supervision; formulation of the main research concept and objectives;
 N.Zh. Shkaruba – development of the research methodology, revising and editing of the final manuscript;
 Yu.G. Vergazova – data verification; data visualization, software development;
 G.A. Nesterkin – writing the original version of the text, presenting and describing the research results, drawing the conclusions.

Conflict of interests

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

Received 07.03.2023; revised 30.05.2023; accepted 30.05.2023