

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА И ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛА «ВАЛ – МАНЖЕТНОЕ УПЛОТНЕНИЕ»

*Стреляная Ю.О., Богуцкий В.Б.*

*Севастопольский государственный университет, Севастополь*

**Ключевые слова:** узел «вал – манжета», герметичность, удельная утечка, трение, микрорельеф, виброобкатка, качество поверхности.

**Аннотация.** В статье отмечается, что работоспособность узла «вал – манжета» и, прежде всего, его герметичность, в значительной степени определяется качеством поверхности вала. В тоже время, типовая технология обработки поверхности валов работающих в таких узлах не обеспечивает в полной мере требования к их эксплуатационным свойствам, в особенности по показателю удельной утечки. Для улучшения эксплуатационных свойств таких узлов предложено на поверхность вала наносить регулярный микрорельеф методом виброобкатывания. Приведены результаты экспериментальной оценки эксплуатационных свойств узла «вал – манжетное уплотнение» с виброобкатанными поверхностями образцов по параметрам величины удельных утечек, износа резиновых манжет и поверхности вала. Отмечается, что изменение показателя удельной утечки в значительно большей степени зависит от формы, взаиморасположения и однородности микрорельефа поверхности вала, чем от его высоты. Сделан вывод о том, что на финишном этапе обработки поверхности вала целесообразно заменить операции шлифование и полирования нанесением регулярного микрорельефа методом виброобкатывания.

## THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MICROGEOMETRY OF THE SHAFT SURFACE AND THE EFFICIENCY CHARACTERISTICS OF THE ASSEMBLY «SHAFT – RADIAL SHAFT SEAL»

*Strelyanaya Yu.O., Bogutsky V.B.*

*Sevastopol State University, Sevastopol*

**Keywords:** shaft-cuff assembly, tightness, specific leakage, abrasion, microrelief, vibration rolling, surface quality.

**Abstract.** The article notes that the operability of the shaft–cuff assembly and, above all, its tightness is largely determined by the quality of the shaft surface. At the same time, the typical surface treatment technology of shafts operating in such nodes does not fully meet the requirements for their exploitation properties, especially in terms of specific leakage. To improve the performance properties of such units, it is proposed to apply a regular microrelief to the surface of the shaft using the vibration rolling method. Are presented the results of an experimental assessment of the operational properties of the shaft–cuff seal assembly with vibro-rolled surfaces of samples according to the parameters of the magnitude of specific leaks, wear of rubber cuffs and the shaft surface. It is noted that the change in the specific leakage indicator depends much more on the shape, relative position and uniformity of the microrelief of the shaft surface than on its height. It is concluded that at the final stage of shaft surface treatment it is advisable to replace the grinding and polishing operations by applying a regular microrelief by vibration rolling.

**Введение.** Надежность механизмов и агрегатов, эксплуатируемых в таких отраслях современного машиностроения, как станкостроение, приборостроение, энергетическое машиностроение и многих других в во многом определяется эффективной и безаварийной работой уплотнений, обеспечивающих герметичность рабочей полости механизма и проходящего через неё вращающегося вала.

Работоспособность узла «вал – манжетное уплотнение» (рис. 1) характеризуется следующими основными характеристиками: эксплуатационные расходы (связанные с убылью смазки, расходы на восстановление и ремонт, потери за время простоя агрегата и пр.) и критерии качества работы узла (параметры точности взаимодействующих деталей, степень герметичности, потери мощности и пр.). Важнейшей характеристикой работоспособности узла «вал – манжетное уплотнение» является степень его герметичности [1-6 и др.].

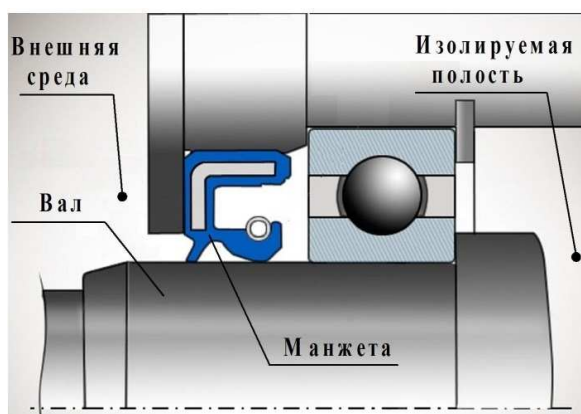


Рис. 1. Узел «вал – манжетное уплотнение»

**Материалы и методы исследований.** Процесс герметизации металлических поверхностей манжетными уплотнениями осуществляется за счет внедрения материала уплотнения в контактирующие с ней неровности поверхности вала, при этом материал уплотнения стремится заполнить впадины микронеровностей уплотняемой поверхности и перекрыть ее (рис. 2). Работоспособность и герметичность пары вал–манжета в значительной степени определяется качеством поверхности вала. Шероховатость металлической поверхности должна быть такой, чтобы обеспечивался плотный непрерывный контакт между поверхностью и уплотняющим элементом, но при этом поверхность должна содержать также углубления (карманы) для сохранения смазки. Как показано в [7-12 и др.] отсутствие смазки на поверхности трения приводит к ухудшению теплообмена, возникновению сухого трения и абразивного износа трущихся поверхностей, а поверхность, содержащая несвязанные углубления со смазкой, обладает меньшим трением при пуске, чем гладкая поверхность и улучшает условия пуска узла.

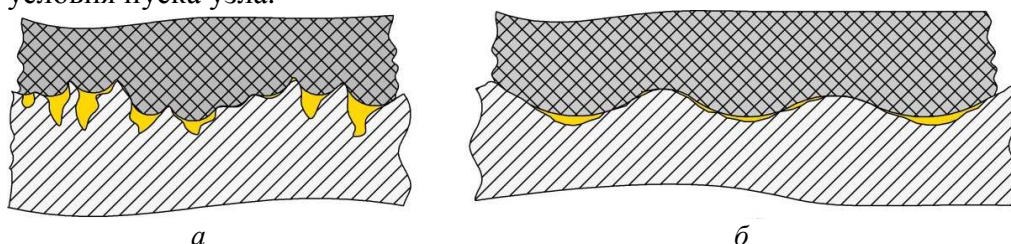


Рис. 2. Схема контактирования материала уплотнения с металлической поверхностью:  
а – шлифованной; б – виброобкатанной

Существенным резервом снижения трения и повышения герметичности уплотнений является улучшение микрогеометрии металлической поверхности путем создания регулярного микрорельефа [13-17].

В настоящее время при уплотнении вращающихся валов наибольшее распространение получили резиновые радиальные манжетные уплотнения кромочного типа, которые обеспечивают минимальный зазор между неподвижными и вращающимися (подвижными) элементами деталей.

По действующей технологии поверхность вращающейся детали, контактирующая с манжетным уплотнением, обтачивается, термически обрабатывается (в зависимости от скорости скольжения HRC 30... HRC 50), шлифуется до Ra 0,63...0,32, затем полируется, хромируется (при эксплуатации изделий в агрессивных средах) и снова полируется. Несмотря на значительную трудоемкость, такой технологический процесс не обеспечивает требуемых эксплуатационных свойств узла «вал – манжета», особенно по величине показателя удельной утечки ( $q < 0,5 \text{ см}^3/\text{ч}$ ) [18-22].

**Цель исследования** – оценить возможность улучшения эксплуатационных свойств узла «вал – манжетное уплотнение» за счет образованного методом виброобкатывания регулярного микрорельефа на поверхности вращающейся детали [15, 23-26].

В качестве образцов, контактирующих с манжетными уплотнениями и имитирующих вращающиеся детали, использовались три комплекта (20 штук в комплекте) предварительно обточенных до  $Ra$  3,2 втулок из стали 45. В каждом комплекте часть из них шлифовалась до  $Ra$  0,32...0,16, а на остальные наносились 12 рекомендованных [23-26] вариантов регулярного микрорельефа поверхности с шероховатостью  $Ra$  3,2...0,16. Характеристики микрорельефа определялись по профилограммам, снятым с виброобкатанных и шлифованных поверхностей образцов.

**Результаты.** Исследования эксплуатационных свойств узла «вал – манжетное уплотнение» проводились на стенде в течение 300 часов (месячный фонд времени работы оборудования в машиностроительных цехах) при скорости вращения 4,75 м/с ( $\approx 3000$  об/мин) и давлениях среды в изолируемой полости  $\approx 0,045...0,05$  МПа. Гидроплотность узла оценивалась величиной удельных утечек, а износ втулок, контактирующих с манжетными уплотнениями – по профилограммам, снятым с изношенных участков. Момент трения определялся по схеме уплотнение-динамометр. Износ резиновых манжет определялся взвешиванием на аналитических весах. Температура в зоне контакта определялась искусственными термopарами нихром-константан. Результаты проведенных исследований приведены в таблице 1.

Табл. 1. Характеристика качества поверхности и результаты испытаний уплотнительных пар.

$R_z$ , мкм	Средний радиус кривизны выступов $r$ , мкм	Среднее значение шага неровностей профиля $S_m$ , мкм	Относительная опорная длина профиля $t_{25}$ , %	Микротвердость, $H_\mu$ МПа	Момент трения $M$ , Нм	Потребляемая мощность $N$ , Вт.	Износ уплотнения $w$ , мг	Температура уплотнения $t_p$ , °С и втулки, °С ( $t_p/t_w$ )	Удельная утечка смазки $q$ , см <sup>3</sup> /час.
<b>Виброобкатывание</b>									
12,75	917	0,62	13,5	317	$3,2 \times 10^{-5}$	48,5	778,5	47/47	1,31
8,75	1350	0,52	19,5	311	$3,4 \times 10^{-5}$	51,1	741,3	50/50	0,31
3,55	2160	0,43	21,2	319	$3,1 \times 10^{-5}$	46,5	823,1	49,5/49,5	1,06
0,95	9600	0,21	22,5	352	$3,15 \times 10^{-5}$	47,5	639,9	48,5/48,5	0,53
<b>Шлифование</b>									
1,42	21	0,087	8,2	874	$5,2 \times 10^{-5}$	65,8	849,6	53/52	1,59
0,87	29	0,041	10,1	883	$4,1 \times 10^{-5}$	65,5	835,4	53/52	1,56

Уплотнительные пары, состоящие из виброобкатанных рекомендованными рельефами стальных образцов, шероховатостью  $Ra$  3,2... $Ra$  0,16 и резиновых манжетных уплотнений обеспечивают снижение удельной утечки (повышение гидроплотности) в 1,28...1,55 раза. Повышение герметичности виброобкатанной поверхности связано с благоприятным микрорельефом, характеризующимся большими средними радиусами кривизны выступов ( $r = 917...9600$  мкм вместо 29 мкм) большими средними шагами неровностей ( $S_m = 0,21...0,62$  мм вместо 0,041 мм). Плотность контакта резины с металлом и перекрытие микропрофиля на виброобкатанных поверхностях гораздо больше, чем у шлифованных.

Несмотря на то, что микротвердость виброобкатанной поверхности образца была в 2,5 раза ниже, ее износ оказался в 1,8...3 раза ниже образца со шлифованной поверхностью (рис. 3). Уменьшился также износ резиновой манжеты. Если достигнутая износостойкость втулок является недостаточной, то после термообработки производится вибровыглаживание поверхности алмазными или твердосплавными заправленными по сфере наконечниками. Увеличение износостойкости термически необработанных виброобкатанных образцов может быть объяснено в первую очередь регулярностью и обтекаемостью виброобкатанного микрорельефа, большей его маслоемкостью и большей опорной поверхностью.

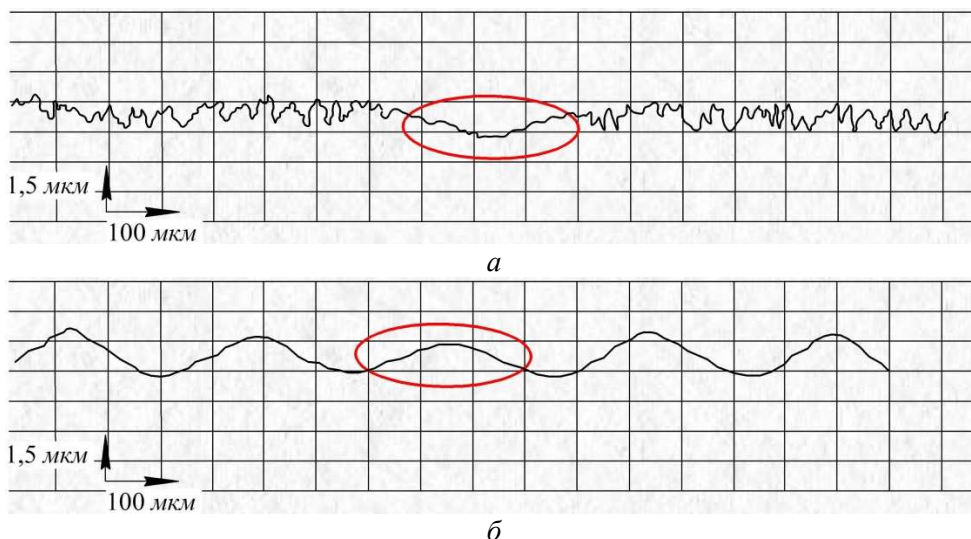


Рис. 3. Профиллограммы изношенных участков поверхностей образцов:  
 а – шлифованный; б – виброобкатанный

Испытания узла «вал – манжетное уплотнение» с виброобкатанными поверхностями образцов показали, что по сравнению с образцами со шлифованными поверхностями на 22...29% уменьшаются момент трения и потребляемая мощность. Закруглённые, однородные по форме, размерам и взаимному расположению микронеровности виброобкатанной поверхности, перемещаясь, вызывают меньшее сопротивление передоформированию поверхностных слоев резины, чем более заостренные микронеровности шлифованной поверхности. На поверхности образуется и поддерживается равномерный и стабильный слой смазки.

Виброобкатанные поверхности имеют большую поверхность касания с поверхностью резиновой манжеты при контактировании, т.е. удельное давление, на поверхностные шероховатости в момент касания (пуска) и приработки меньше, чем на шлифованной поверхности. Это наглядно иллюстрируется начальными участками относительных опорных кривых виброобкатанного и шлифованного профилей (рис. 4).

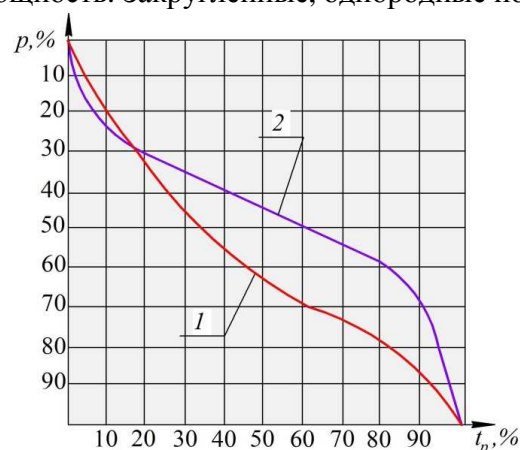


Рис. 4. Относительные опорные кривые профилей: 1 – виброобкатанная поверхность ( $R_z=8,75$  мкм); 2 – шлифованная ( $R_z=1,42$  мкм)

### Выводы

1. На основании результатов исследований можно сделать вывод о целесообразности изменения технологии обработки поверхности вращающейся детали, которая непосредственно контактирует с манжетным уплотнением, в частности – исключение операций шлифования и полирования. Виброобкатывание применяется как окончательная операция обработки. Такое технологическое решение экономически эффективно и обеспечивает значительное сокращение производственного цикла обработки при улучшенных эксплуатационных характеристиках узла.

2. Наибольшую эффективность (для условий работ, в которых проводились испытания узла «вал – манжетное уплотнение») показали поверхности детали, имеющие виброобкатанный микрорельеф с  $Ra\ 2,5$ . Изменение показателя удельной утечки и момента трения в значительно большей степени зависит от формы, взаиморасположения и однородности микрорельефа поверхности вращающейся детали, чем от его высоты.

3. Микрорельефы валов узла «вал – манжетное уплотнение», обработанные по

различным технологиям, целесообразно сравнивать по величинам среднего радиуса кривизны выступов, среднего шага неровностей профиля и относительной опорной длине профиля.

#### Список литературы

1. Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б., Гордеев В.В., Фурманов Б.А., Кармунгин Б.В. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
2. Орлов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. / Под ред. П.Н. Учаева. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.
3. Flitney Robert K. Seals and Sealing Handbook. – Elsevier Publ., 2014. – 648 p.
4. Yu Z., Shevchenko S., Radchenko M., Shevchenko O. and Radchenko A. Methodology of designing sealing systems for highly loaded rotary machines // Sustainability. 2022, vol. 14(23), p. 15828. DOI:10.3390/su142315828.
5. Огар П.М., Тарасов В.А., Корсак И.И. Системный подход к проблеме оптимального проектирования герметизирующих устройств // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4(16). – С. 86-92.
6. Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б., Ягъяев Э.Э. Эксплуатация, обслуживание и диагностика технологических машин. Учебное пособие. – М.: Изд-во: НИЦ ИНФРА-М, 2023. – 356 с.
7. Сорокин В.М. Качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства поверхностей деталей и методы их повышения. – Н. Новгород: НГТУ, 1994. – 120 с.
8. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
9. The Tribology Handbook / Ed. by M.J. Neale. – Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 2001. – 528 p.
10. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
11. Tribology in Engineering / Ed. by Hasim Pihtili. – Publ.: InTech., 2013. – 240 p.
12. Shepelenko I., Solovykh E., Bevez O., Katerynych S. & Solovuch A. Research of the surface oil absorption processed by vibration rolling and deforming broaching // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023, vol. 687, pp. 131-138.
13. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
14. Кочин А.Н., Желонкин М.В., Головин А.А. Влияние регулярного микрорельефа на эксплуатационные показатели деталей машин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 3(110). – С. 104-109.
15. Мельников П.А., Пахоменко А.Н. Повышение надежности работы манжетных уплотнений за счет оптимизации микрорельефа шейки вала // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-5. – С. 1005-1009.
16. Маслякова И.А. Повышение износостойкости подвижных цилиндрических соединений с упрочненными пластическим деформированием поверхностями путем рационального сочетания их микрорельефов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Саратов, 1999. – 15 с.
17. Ren N., Lee Si C. The effects of surface roughness and topography on the contact behavior of elastic bodies // Journal of Tribology. 1994, vol. 116, iss. 4, pp. 804-810.
18. Кондаков Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1982. – 286 с.
19. Yakovlev S.N. An experimental study of the wear of the radial shaft seals of rotary shafts // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019, vol. 48, pp. 179-183. doi.org/10.3103/S105261881902016X.
20. Grün J., Feldmeth S., Bauer F. Wear on radial lip seals: a numerical study of the influence on the sealing mechanism // Wear. 2021, vol. 476, p. 203674. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203674.
21. Stakenborg M.J.L. On the sealing mechanism of radial lip seals // Tribology International. 1988, vol. 21(6), pp. 335-340. DOI: 10.1016/0301-679x(88)90110-7.
22. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П. Исследование основных эксплуатационных свойств нового класса уплотнительных материалов для проточного тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – №3. – С. 15-20.
23. Шнейдер Ю.Г., Рейнус А.Л., Ерченков А.И. Влияние качества металлической поверхности на усилие трения и герметичность уплотнительной пары // Вестник машиностроения. – 1969. – № 6. – С. 21-32.
24. Павлова В.А., Павлов В.И. Аналитический обзор методов нанесения регулярного микрорельефа на поверхностях деталей // Вестник СГТУ. – 2020. – № 4(87). – С. 83-87.
25. Talamanov V., Kozenkova G., Kozenkov V., Kondratyev S., Heckert E. Optimization of the parameters of a partially regular microrelief by vibration rolling method // E3S: Web of Conferences. 2021 vol. 326, p. 00017. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600017.
26. Vladimirov A., Afonin A., Makarov A., Titova A. Revisiting the tangential oscillations of the tool to form the microrelief of the workpiece surface // Vibroengineering Procedia. 2020, vol. 32, p. 21361. doi.org/10.21595/vp.2020.21361.

#### References

1. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Seals and sealing equipment. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – 464 p.

2. Orlov P.I. Fundamentals of design: reference manual. In 2 books / Ed. by P.N. Uchaev. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – 544 p.
3. Flitney Robert K. Seals and Sealing Handbook. – Elsevier Publ., 2014. – 648 p.
4. Yu Z., Shevchenko S., Radchenko M., Shevchenko O. and Radchenko A. Methodology of designing sealing systems for highly loaded rotary machines // Sustainability. 2022, vol. 14(23), p. 15828. DOI:10.3390/su142315828.
5. Ogar P.M., Tarasov V.A., Korsak I.I. A systematic approach to the problem of optimal design of sealing devices // Systems. Methods. Technologies. 2012, no. 4(16), pp. 86-92.
6. Bogutsky V.B., Shron L.B., Yagyaev E.E. Operation, maintenance and diagnostics of technological machines. Textbook. – M.: Publ.: SIC INFRA-M, 2023. – 356 p.
7. Sorokin V.M. The quality of the surface layer and the operational properties of the surfaces of parts and methods of their improvement. – N. Novgorod: NSTU, 1994. – 120 p.
8. Friction, wear and lubrication. Handbook. In 2 books. Book 2 / Ed. by I.V. Kragelsky, V.V. Alisin. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – 358 p.
9. The Tribology Handbook / Ed. by M.J. Neale. – Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 2001. – 528 p.
10. Demkin N.B., Ryzhov E.V. Surface quality and contact of machine parts.– M.: Mechanical Engineering, 1981. – 244 c.
11. Tribology in Engineering / Ed. by Hasim Pihtili. – Publ.: InTech., 2013. – 240 p.
12. Shepelenko I., Solovykh E., Bevz O., Katerynych S. & Solovuch A. Research of the surface oil absorption processed by vibration rolling and deforming broaching // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023, vol. 687, pp. 131-138.
13. Surface engineering of parts / Ed. by A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – 320 p.
14. Kochin A.N., Zhelonkin M.V., Golovin A.A. The influence of regular microrelief on the performance of machine parts // Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. 2015, no. 3(110), pp. 104-109.
15. Melnikov P.A., Pakhomenko A.N. Improving the reliability of the cuff seals due to optimization of the microrelief of the shaft neck // Fundamental Research. 2013, no. 10-5, pp. 1005-1009.
16. Maslyakova I.A. Increasing the wear resistance of movable cylindrical joints with surfaces hardened by plastic deformation by a rational combination of their microreliefs: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Saratov, 1999. – 15 p.
17. Ren N., Lee Si C. The effects of surface roughness and topography on the contact behavior of elastic bodies // Journal of Tribology. 1994, vol. 116, iss. 4, pp. 804-810.
18. Kondakov L.A. Working fluids and seals of hydraulic systems. – M.: Mechanical Engineering, 1982. – 286 p.
19. Yakovlev S.N. An experimental study of the wear of the radial shaft seals of rotary shafts // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019, vol. 48, pp. 179-183. doi.org/10.3103/S105261881902016X.
20. Grün J., Feldmeth S., Bauer F. Wear on radial lip seals: a numerical study of the influence on the sealing mechanism // Wear. 2021, vol. 476, p. 203674. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203674.
21. Stakenborg M.J.L. On the sealing mechanism of radial lip seals // Tribology International. 1988, vol. 21(6), pp. 335-340. DOI: 10.1016/0301-679x(88)90110-7.
22. Migunov V.P., Farafonov D.P. Investigation of the basic operational properties of a new class of sealing materials for the GTE flow path // Aviation materials and technologies. 2011, no. 3, pp. 15-20.
23. Schneider Yu.G., Reinus A.L., Yerchenkov A.I. Influence of the quality of the metal surface on the friction force and tightness of the sealing pair // Bulletin of mechanical engineering. 1969, no. 6, pp. 21-32.
24. Pavlova V.A., Pavlov V.I. Analytical review of methods for applying regular microrelief on the surfaces of parts // Bulletin of the SSTU. 2020, no. 4(87), 83-87.
25. Talamanov V., Kozenkova G., Kozenkov V., Kondratyev S., Heckert E. Optimization of the parameters of a partially regular microrelief by vibration rolling method // E3S: Web of Conferences. 2021 vol. 326, p. 00017. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600017.
26. Vladimirov A., Afonin A., Makarov A., Titova A. Revisiting the tangential oscillations of the tool to form the microrelief of the workpiece surface // Vibroengineering Procedia. 2020, vol. 32, p. 21361. doi.org/10.21595/vp.2020.21361.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Стреляная Юлия Олеговна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»	<b>Strelyanaya Yulia Olegovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of «Digital design»
<b>Богуцкий Владимир Борисович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»	<b>Bogutsky Vladimir Borisovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the «Department of mechanical engineering technology»
joulia.bayrakova@mail.ru	

Получена 16.01.2024