

Триботехнические свойства материалов для опор скольжения культиваторов

Вячеслав Александрович Денисов,

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: va.denisov@mail.ru;

Роман Николаевич Задорожний,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: warrior-saint@yandex.ru;

Илья Владимирович Романов,

младший научный сотрудник,
e-mail: gosniti1953@mail.ru;

Наталья Игоревна Чумак,

ведущий инженер,
e-mail: chumak@vimlab.ru;

Александр Олегович Шитов,

инженер, e-mail: shitov@vimlab.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что сельхозтехника выходит из строя преимущественно из-за износа конструктивных деталей. Подчеркнули актуальность поиска новых материалов для изготовления отдельных узлов машин, которые по своим характеристикам не будут уступать прототипам. Акцентировали внимание на деталях, работающих в подвижных соединениях, в частности на бронзовых подшипниках скольжения типа «втулка», которые подвержены большим износам и часто нуждаются в замене. Предположили, что изготовление таких деталей из полимеров поможет решить проблему преждевременного выхода из строя узлов машины. (*Цель исследования*) Сравнить триботехнические свойства опор скольжения культиватора, изготовленных из бронзы и полиамида. (*Материалы и методы*) Изготовили два образца: один из подшипника скольжения (бронза марки БрО10Ф1) культиватора *SunGarden GT10*, второй – из прутка полиамида марки ПА-6. Использовали специальное оборудование: рентгенофлуоресцентный спектрометр *Thermo Scientific Niton XL3t 900 GOLDD+*, трибометр *TRB-S-DE Tribometer CSM Instruments*. (*Результаты и обсуждение*) Провели сравнительные триботехнические испытания по схеме «шар – диск». Установили преимущество образца из полиамида перед эталоном из бронзы: по коэффициенту трения – в 4 раза, по интенсивности изнашивания – в 12 раз. (*Выводы*) Определили, что применение подшипников скольжения из полимеров поможет продлить срок службы сельскохозяйственных культиваторов в 2 раза и повысить эффективность использования в 1,5 раза.

Ключевые слова: опора скольжения, подшипник, бронза, полиамид, триботехника, коэффициент трения, износостойкость, культиватор.

■ **Для цитирования:** Денисов В.А., Задорожний Р.Н., Романов И.В., Чумак Н.И., Шитов А.О. Триботехнические свойства материалов опор скольжения культиваторов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №4. С. 13-18. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-13-18. EDN ZCTXVW.

Tribotechnical Properties of Materials for Cultivator Sliding Bearings

Vyacheslav A. Denisov,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: va.denisov@mail.ru;

Roman N. Zadorozhnyi,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: warrior-saint@yandex.ru;

Ilya V. Romanov,

junior researcher, e-mail: gosniti1953@mail.ru;

Natalia I. Chumak,

leading engineer, e-mail: chumak@vimlab.ru;

Alexander O. Shitov,

engineer, e-mail: shitov@vimlab.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Agricultural machinery is stated to break down mainly due to the wear of structural parts. Thus, there is a necessity to apply new materials for manufacturing individual machine units whose characteristics will not be inferior to those of their prototypes. The paper primarily focuses on the components that work in movable joints, in particular, on the sleeve type bronze plain bearings which are exposed to high wear and often need replacing. The use of polymers for manufacturing such parts is supposed to solve the problem of untimely failure of machine components. (*Research purpose*) To compare the tribotechnical

properties of cultivator sliding bearings made of bronze and polyamide. (*Materials and methods*) Two samples were made: one was made of the sliding bearing (BrO10F1 grade bronze) of the SunGarden GT10 cultivator, the other – of a PA-6 polyamide type rod. Special equipment was used such as: X-ray fluorescence spectrometer Thermo Scientific Niton XL3t 900 GOLDD+, TRB-S-DE Tribometer CSM Instruments. (*Results and discussion*) Comparative tribotechnical ball-disk tests were carried out. It was found out that polyamide sample has certain advantages over a bronze standard: it has a 4-times better friction coefficient and a 12-times better wear intensity. (*Conclusions*) It was determined that the use of polymer plain bearings will result in 2 times longer service life of agricultural cultivators and their 1.5 times increased efficiency.

Keywords: sliding bearing, bearing, bronze, polyamide, tribotechnics, friction coefficient, wear resistance, cultivator.

For citation: Denisov V.A., Zadorozhnyi R.N., Romanov I.V., Chumak N.I., Shitov A.O. Tribotekhnicheskie svoystva materialov dlya opor skol'zheniya kul'tivatorov [Tribotechnical properties of materials for cultivator sliding bearings]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N4. 13-18 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-13-18. EDN ZCTXVW.

В конструкциях современной сельхозтехники все чаще применяют новые материалы [1-3]. Наиболее перспективные направления – применение полимерных и композиционных материалов, а также замена металлических узлов трения на полимерные [4-7]. Использование полимеров помогает снизить интенсивность изнашивания, продлить срок эксплуатации узла и тем самым предотвратить преждевременный выход оборудования из строя.

В конструкции некоторых культиваторов, например садового *SunGarden GT10*, имеются опоры скольжения (рис. 1).

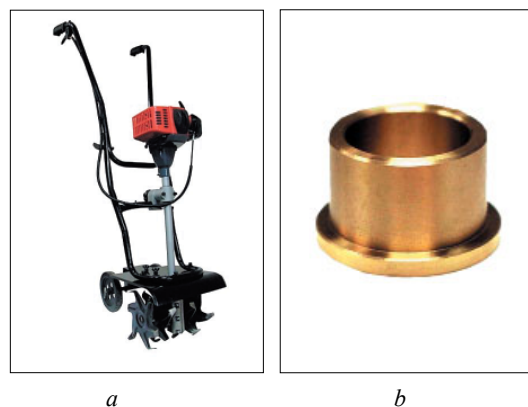


Рис. 1. Культиватор SunGarden GT10 (а) и подшипник скольжения SG7-GT10-034, используемый в его конструкции (б)

Fig. 1. SunGarden GT10 Cultivator (a) and sliding bearing SG7-GT10-034(b), used in its construction

Оригинальная конструкция указанного культиватора предполагает использование опоры скольжения из бронзового сплава. В то же время, как показывает обзор работ по исследованию свойств полиамидов, для этих материалов характерны низкие коэффициенты трения и малая величина износа, что важно при изготовлении опор скольжения [8-10]. Кроме того, стоимость полимеров меньше по сравнению с бронзой.

Цель исследования – сравнение триботехнических характеристик бронзы и полиамида для изготовления опор скольжения культиватора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Поскольку в литературных источниках не указана марка материала, применяемого для изготовления подшипника скольжения культиватора *SunGarden GT10*, на первом этапе исследовали химический состав с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра *Thermo Scientific Niton XL3t 900 GOLDD+*. Сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными о химическом составе бронзовых сплавов позволило установить, что для изготовления подшипника применяли оловянную бронзу, близкую по составу российской марке БрО10Ф1 согласно ГОСТ 613-79 (табл. 1).

Таблица 1		Table 1
СОПОСТАВЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ БРОНЗОВЫХ СПЛАВОВ, %		
COMPARISON OF CHEMICAL COMPOSITIONS OF BRONZE ALLOYS, %		
Элементы Elements	Экспериментальные данные Experimental data	Бронза марки БрО10Ф1 BrO10F1 bronze type
Cu	89,17	86,9-90,6
Sn	9,90	9-11
Fe	0,79	< 0,2
Pb	0,67	< 0,3
Zn	0,53	< 0,3
Sb	0,37	< 0,3

Как показало исследование состава, количество примесей превышает гостированные значения. Это говорит о том, что производитель пренебрег чистотой материала при производстве детали.

Триботехнические характеристики оригинального материала исследовали на образцах, изготовленных непосредственно из подшипника. В качестве альтернативы выбрали образцы из прутка полиамида марки ПА-6 диаметром 50 мм. Полиамиды – наиболее распространенные термопластичные антифрикционные материалы. Они обладают низким коэффициентом трения, достаточно износостойкие, способны работать в широком интервале температур – от –40°C до +80°C. Их применяют для изготовления уз-

лов трения, как в чистом виде, так и с наполнителями: фторопластом, дисульфидом молибдена, графитом и другими смазками. Благодаря высокой механической прочности полиамидов армировать их не нужно, поэтому в них вводят лишь добавки, снижающие коэффициент трения и износ.

Образцы испытывали на трение на трибометре *TRB-S-DE Tribometer CSM Instruments* по соответствующей методике [11-13]. В качестве схемы трения выбрали вариант «шар – диск» (рис. 2). Контртелом выступал шарик из закаленной стали диаметром 5 мм. Скольжение контртела относительно образца обеспечивали путем вращения платформы с образцом при скорости вращения 200 об/мин. Путь трения составил 4000 м.

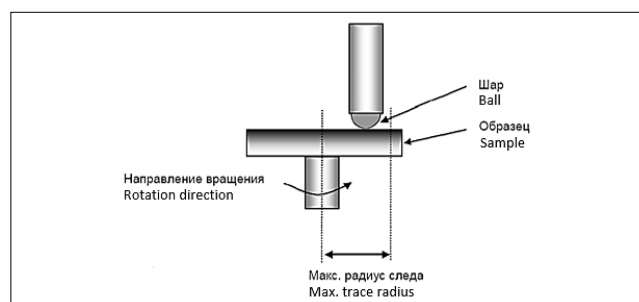


Рис. 2. Реализуемая схема трения

Fig. 2. Implemented friction scheme

Испытательную нагрузку определяли методом ступенчатого нагружения. Суть данного метода заключается в том, что нагрузку, прикладываемую к образцу в процессе испытания, раз в 20 мин повышают на 0,5 Н до тех пор, пока прибор не начнет регистрировать скачки коэффициента трения, что сигнализирует о заедании. После этого следует плавная разгрузка с повторением тех же самых ступеней. Определили зависимость коэффициента трения от пути трения (рис. 3).

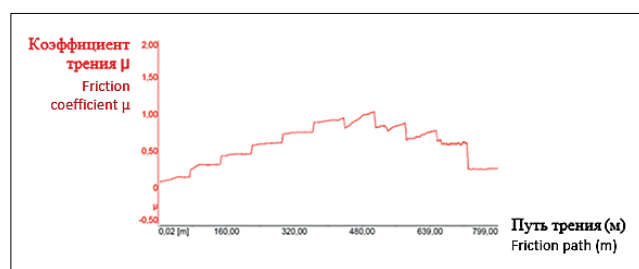


Рис. 3. Коэффициент трения при ступенчатом нагружении

Fig. 3. Friction coefficient under step loading

Далее рассчитали изменение коэффициента трения при переходе со ступени на ступень. Проанализировали полученный ряд значений и определили с его помощью рабочую нагрузку P_0 , при которой изменение коэффициента трения минимально. Последующие основные испытания материала проводили

при нагрузке P_0 . По этой методике определяли рабочую нагрузку для каждого образца [14-16].

Кроме коэффициента трения, вычисляли интенсивность объемного изнашивания образцов, $\text{мм}^3/\text{м}$:

$$I_V = \Delta m / (L \cdot \rho),$$

где $\Delta m = m_0 - m_1$ – массовый износ, г;

m_0 – масса исследуемого на трение образца до начала испытаний, г;

m_1 – масса образца после испытаний на трение, г;

L – путь трения, м;

ρ – плотность материала, $\text{г}/\text{мм}^3$.

Массу образцов измеряли с помощью высокоточных весов *A&D GR-200* с дискретностью 0,1 мг.

Результаты и обсуждение. Перед началом основного испытания для каждого исследуемого образца установили испытательную нагрузку P_0 методом ступенчатого нагружения. В процессе нагружения и разгрузки фиксируют значения коэффициента трения на каждой «ступеньке». Затем вычисляют изменение коэффициента, то есть разницу между коэффициентом текущей и предыдущей «ступени» (табл. 2). Например, в процессе нагружения при 1 Н коэффициент трения составляет 0,327, а при 0,5 Н – 0,146. Следовательно, изменение коэффициента трения при нагрузке 1 Н составляет: $0,327 - 0,146 = 0,181$.

Результаты триботехнических испытаний образцов из бронзы и полиамида показали, что средний коэффициент трения для полиамида равен 0,15, тогда как для бронзы он почти в 30 раз больше – 4,15. Причина низкого значения в варианте с полиамидом заключается в том, что в процессе трения на его поверхности образуется слой ориентированных в направлении трения макромолекул, которые легко скользят друг по другу вследствие низкого межмолекулярного взаимодействия [17-19] (табл. 3).

Перед основными испытаниями для каждого образца экспериментально в соответствии с методикой выбирают оптимальную нагрузку. В реальных условиях эксплуатации рабочую нагрузку устанавливают после приработки. Ступенчатый метод позволяет симулировать эти условия и определить оптимальную нагрузку испытаний, близкую к реальной. Эта нагрузка может быть разной не только для каждого материала, но и для каждого образца.

Далее установили массовый износ образцов и интенсивность объемного изнашивания (табл. 4).

Как и в случае с коэффициентом трения, бронза уступает полиамиду: для сплава BrO10Ф1 интенсивность объемного износа составила $30,05 \cdot 10^{-9} \text{ мм}^3/\text{м}$, тогда как для полиамида в 12 раз меньше – $2,37 \cdot 10^{-9} \text{ мм}^3/\text{м}$. Более интенсивный износ бронзы, вероятно, обусловлен повышенным коэффициентом трения, из-за чего в материале быстрее накапливаются критические напряжения, способствующие разрушению [20].

Выводы. Полиамид марки ПА-6 имеет лучшие

Таблица 2		Table 2		
Коэффициент трения и его изменение при ступенчатом нагружении образца Friction coefficient and its change under step loading of the sample				
Нагрузка, Н Load, N	Коэффициент трения Friction coefficient		Изменение коэффициента трения Friction coefficient changes	
	нагружение / loading	разгружение unloading	нагружение / loading	разгружение unloading
0,5	0,146	0,267	0,146	0,352
1,0	0,327	0,618	0,181	0,107
1,5	0,476	0,725	0,149	0,122
2,0	0,620	0,847	0,144	0,064
2,5	0,769	0,911	0,149	0,020
3,0	0,931	0,931	0,162	0,162

Таблица 3			Table 3		
РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ (ПУТЬ ТРЕНИЯ 4000 м, СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ 200 ОБ/МИН) RESULTS OF TRIBOTECHNICAL TESTS OF SAMPLES (FRICTION PATH 4000 m, ROTATION SPEED 200 RPM)					
Марка материала Type of material	№ образца Sample number	Рабочая нагрузка, Н Operating load, N	№ дорожки трения Friction path number	Коэффициент трения Friction coefficient	Средний коэффициент трения Average friction coefficient
Полиамид марки ПА-6 PA-6 type polyamide	1	1,0	1	0,15	0,15
			2	0,14	
			3	0,17	
	2	1,5	1	0,13	
			2	0,18	
			3	0,14	
Бронза БрО10Ф1 BrO10F1 type bronze	1	6,0	1	4,23	4,15
			2	3,72	
			3	4,51	

Таблица 4		Table 4		
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗНОСА ОБРАЗЦОВ CALCULATION RESULTS FOR THE SAMPLE WEAR INDICATORS				
Марка материала Type of material	№ образца Sample number	№ дорожки трения Friction path number	Массовый износ, г Weight wear, g	Средняя интенсивность объем- ного изнашивания, мм ³ /м·10 ⁻⁹ Average intensity of volume wear, mm ³ /m·10 ⁻⁹
Полиамид марки ПА-6 PA-6 polyamide type	1	1	0,0012	2,37
		2	0,0008	
		3	0,0016	
	2	1	0,0010	
		2	0,0011	
		3	0,0009	
Бронза БрО10Ф1 BrO10F1 bronze type	1	1	0,1053	30,05
		2	0,1157	
		3	0,0971	

триботехнические характеристики по сравнению с оловянной бронзой марки БрО10Ф1, применяемой для изготовления подшипника скольжения культиватора *SunGarden GT10*. Средний коэффициент трения для полиамида составил 0,15, для бронзы – 4,15; интенсивность объемного износа – $2,37 \cdot 10^{-9}$ и $30,05 \cdot 10^{-9}$ мм³/м соответственно. Причина низкого коэффициента трения полиамида кроется в особом порядке организации молекул в приповерхностных слоях полимера.

Таким образом, можно ожидать, что подшипники скольжения из полиамида будут гораздо более долговечными, чем из бронзы. В дальнейшем планируется провести эксплуатационные испытания подшипников культиватора *SunGarden GT10*, выполненных из полиамида, а также исследовать триботехнические свойства композитов различного состава на основе полиамида.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 536-538.
2. Izmailov A.Yu., Moskovsky M.N., Podlesnyi D.S. Development of a set of working units from polymeric materials for the design of combine harvesters. *MATEC Web of Conferences. 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2018. 05010.
3. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N3. С. 12-18.
4. Дорохов А.С., Свиридов А.С., Гончарова Ю.А., Алехина Р.А. Оценка химической стойкости полиуретановых компаундов, применяемых при изготовлении диафрагм мембранно-поршневых насосов // *Техника и оборудование для села*. 2021. N8 (290). С. 41-44.
5. Славкина В.Э., Кузьмин А.М., Гончарова Ю.А., Алехина Р.А., Денисов В.А. Исследование реологических свойств композиционных материалов для изготовления распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2022. N6. С. 26-33.
6. Sharifullin S.N., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Kudryashova E.Y., Reschikov E.O., Izikaeva A.I. Tribotechnical tests of layered polymers. *Tribology in Industry*. 2020. Vol. 42. N1. 81-88.
7. Slavkina V., Lopatina Yu. Study of tribotechnical characteristics of 3d printed abs plastic samples. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Modern Power Engineering*. 2020. 012032.
8. Shibata K., Yamaguchi T., Hokkirigawa K. Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites. *Wear*. 2014. Vol. 317. Iss. 1-2. 1-7.
9. Li J., Xia Y.C. The reinforcement effect of carbon fiber on the friction and wear properties of carbon fiber reinforced PA6 composites. *Fibers and polymers*. 2009. V. 10. N4. 519-525.
10. Unal H., Mimaroglu A. Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions. *Wear*. 2012. Vol. 289. 132-137.
11. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Romanov I.V., Zuevskiy V.A. The tribotechnical properties of electrosparks with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022. Vol. 12. N3. 312.
12. Романов И.В., Задорожный Р.Н. Оценка триботехнических свойств покрытия, полученного электроискровым упрочнением // *Технический сервис машин*. 2020. N4 (141). С. 157-163.
13. Романов И.В., Задорожный Р.Н., Денисов В.А. Исследование триботехнической работоспособности вторичных бронзовых материалов // *МашиТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции*. Москва. 2022. С. 340-343.
14. Евсюков А.А., Денисов В.А. Исследование физико-механических свойств электроискровых покрытий // *МашиТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции*. Москва. 2022. С. 297-299.
15. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Сидоркин О.А., Задорожный Р.Н., Струнkin П.В. Аналитическая оценка износа рабочей поверхности шнековых устройств с композиционным покрытием // *Технический сервис машин*. 2021. N2(143). С. 151-161.
16. Денисов В.А., Кудряшова Е.Ю., Романов И.В., Решиков Е.О. Сравнительные испытания на износостойкость слоистых полимеров с добавлением армирующих волокон // *Труды ГОСНИТИ*. 2018. Т. 132. С. 164-175.
17. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2021. N3(144). С. 146-154.
18. Denisov V.A., Slavkina V.E., Sviridov A.S., Goncharova Y.A. Study of 3D printed agricultural slotted spray nozzles. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. Vol. 51. N3. С. 271-276.
19. Славкина В.Э., Кузьмин А.М., Гончарова Ю.А., Алехина Р.А., Денисов В.А. Исследование реологических свойств композиционных материалов для изготовления распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2022. N6. С. 26-33.
20. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Соломашкин А.А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин // *Технический сервис машин*. 2020. N1(138). С. 50-57.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu. Intellektual'nye tekhnologii i robotizirovannye sredstva v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Intelligent technologies and robotic means in agricultural production]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2019. Vol. 89. N5. 536-538 (In Russian).
2. Izmailov A.Yu., Moskovsky M.N., Podlesnyi D.S. Development of a set of working units from polymeric materials for the design of combine harvesters. *MATEC Web of Conferences. 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2018. 05010 (In English).
3. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V., Kurbanov R.K. Tekhnicheskie sredstva dlya himicheskoy zashchity rasteniy: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects]. *Agroinzheneriya*. 2022. Vol. 24. N3. 12-18 (In Russian).
4. Dorokhov A.S., Sviridov A.S., Goncharova Yu.A., Alekhina R.A. Otsenka himicheskoy stoykosti poliuretanovykh kompoundov, primenyaemykh pri izgotovlenii diafragm membranno-porshnevykh nasosov [Evaluation of the chemical resistance of polyurethane compounds used in the manufacture of diaphragms for diaphragm piston pumps] *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N8 (290). 41-44 (In Russian).
5. Slavkina V.E., Kuz'min A.M., Goncharova Yu.A., Alekhina R.A., Denisov V.A. Issledovanie reologicheskikh svoystv kompozitsionnykh materialov dlya izgotovleniya raspyliteley sel'skokhozyaystvennykh opryskivateley [Investigation of rheological properties of composite materials for manu-

- facture of sprayers of agricultural sprayer-machines] *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2022. N6. 26-33 (In Russian).
6. Sharifullin S.N., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Kudryashova E.Y., Reschikov E.O., Izikaeva A.I. Tribotechnical tests of layered polymers. *Tribology in Industry*. 2020. Vol. 42. N1. 81-88 (In English).
 7. Slavkina V., Lopatina Yu. Study of tribotechnical characteristics of 3d printed abs plastic samples. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Modern Power Engineering*. 2020. 012032 (In English).
 8. Shibata K., Yamaguchi T., Hokkirigawa K. Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites. *Wear*. 2014. Vol. 317. 1-2. 1-7 (In English).
 9. Li J., Xia Y.C. The reinforcement effect of carbon fiber on the friction and wear properties of carbon fiber reinforced PA6 composites. *Fibers and polymers*. 2009. Vol. 10. N4. 519-525 (In English).
 10. Unal H., Mimaroglu A. Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions. *Wear*. 2012. Vol. 289. 132-137 (In English).
 11. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Romanov I.V., Zuevskiy V.A. The tribotechnical properties of electrosparks with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022. Vol. 12. N3. 312 (In English).
 12. Romanov I.V., Zadorozhny R.N. Otsenka tribotekhnicheskikh svoystv pokrytiya, poluchennogo elektroiskrovym uprochneniem [Evaluation of tribotechnical properties of the coating obtained by electric spark hardening]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2020. N4 (141). 157-163 (In Russian).
 13. Romanov I.V., Zadorozhny R.N., Denisov V.A. Issledovanie tribotekhnicheskoy rabotosposobnosti vtorichnykh bronzovykh materialov [Tribological performance of secondary bronze materials]. *MashTekh 2022. Innovatsionnye tekhnologii, oborudovanie i material'nye zagotovki v mashinostroenii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moscow. 2022. 340-343 (In Russian).
 14. Evsyukov A.A., Denisov V.A. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv elektroiskrovyykh pokrytiy [Physical and mechanical properties of electrospark coatings]. *MashTekh 2022. Innovatsionnye tekhnologii, oborudovanie i material'nye zagotovki v mashinostroenii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moscow. 2022. 297-299 (In Russian).
 15. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Sidorkin O.A., Zadorozhny R.N., Strunkin P.V. Analiticheskaya otsenka iznosa rabochey poverkhnosti shnekovykh ustroystv s kompozitsionnym pokrytiem [Analytical assessment of wear of the working surface of screw devices with composite coating]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2021. N2 (143). 151-161 (In Russian).
 16. Denisov V.A., Kudryashova E.Yu., Romanov I.V., Reschikov E.O. Sravnitel'nye ispytaniya na iznosostoykost' sloistyykh polimerov s dobavleniem armiruyushchikh volokon [Comparative tests on wear resistance of layered polymers with the addition of reinforcing fibers]. *Trudy GOSNITI*. 2018. Vol. 132. 164-175 (In Russian).
 17. Goncharova Yu.A., Denisov V.A. Analiz otkazov polimernykh detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Failures of polymer parts of agricultural machinery]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2021. N3(144). 146-154 (In Russian).
 18. Denisov V.A., Slavkina V.E., Sviridov A.S., Goncharova Y.A. Study of 3D printed agricultural slotted spray nozzles. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. Vol. 51. N3. 271-276 (In English).
 19. Slavkina V.E., Kuz'min A.M., Goncharova Yu.A., Alekhina R.A., Denisov V.A. Issledovanie reologicheskikh svoystv kompozitsionnykh materialov dlya izgotovleniya raspylitley sel'skokhozyaystvennykh opryskivately [Investigation of rheological properties of composite materials for manufacture of sprayers of agricultural sprayer-machines]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2022. N6. 26-33 (In Russian).
 20. Chernoiyanov V.I., Denisov V.A., Solomashkin A.A. Spособ opredeleniya ostatochnogo resursa detaley mashin [How to determine the remaining life of machine parts]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2020. N1(138). 50-57 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Денисов В.А. – научное руководство, анализ экспериментальных результатов;
 Задорожний Р.Н. – проведение испытаний, анализ экспериментальных результатов;
 Романов И.В. – редактирование и доработка текста статьи, подготовка материала к публикации;
 Чумак Н.И. – редактирование и доработка текста статьи;
 Шитов А.О. – проведение испытаний, обработка экспериментальных результатов, подготовка текста статьи.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Denisov V.A. – scientific guidance, analysis of experimental results;
 Zadorozhny R.N. – conducting experiments, analysis of experimental results;
 Romanov I.V. – proofreading and finalizing the text of the article, preparing the material for publication;
 Chumak N.I. – proofreading and finalizing the text of the article;
 Shitov A.O. – conducting experiments, processing experimental results, preparing the text of the article.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

03.08.2022
10.10.2022