

Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин

Яков Петрович Лобачевский,
академик-секретарь
Отделения сельскохозяйственных наук РАН,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН, e-mail: vim@vim.ru;

Денис Александрович Миронов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Анастасия Владимировна Миронова,
научный сотрудник,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что от характеристик рабочих органов существенно зависит эффективность эксплуатации сельскохозяйственных машин или орудий. Подчеркнули важность таких параметров, как надежность и ресурс, которые в значительной степени зависят от износостойкости, прочности, а также от конструктивных особенностей. (*Цель исследования*) Обосновать выбор современных эффективных направлений для повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин, а также видов и характеристик применяемых материалов и технологических способов их упрочнения. (*Материалами и методы*) Изучили многолетний опыт работы ФНАЦ ВИМ по данному направлению. Провели предметный анализ соответствующей технической информации. (*Результаты и обсуждение*) Представили основы и условия абразивного изнашивания деталей сельхозмашин. Раскрыли понятие «конструкционной износостойкости». Проанализировали материалы (стали, твердые сплавы) рабочих органов сельхозмашин, используемых в России и за рубежом. Привели их основные сравнительные физико-механические характеристики. Предложили методику выбора базовых конструктивных параметров исходя из прочностных характеристик применяемых материалов. Сравнили наплавочные технологии упрочнения рабочих органов сельхозмашин. Обосновали наиболее эффективные технологические варианты, отдельные технико-экономические параметры, рекомендации по применению материалов. (*Выводы*) Доказали, что применение наплавочных технологий повышает ресурс рабочих органов в 1,5-4,5 раза при значительной экономической эффективности.

Ключевые слова: рабочие органы, износостойкость, ресурс рабочих органов, твердые сплавы, стали, упрочняющие технологии, наплавочные технологии, экономическая эффективность.

■ Для цитирования: Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 41-50. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50. EDN IEUNKO.

Increasing the Operating Lifetime of Wearable Working Bodies of Agricultural Machines

Yakov P. Lobachevskiy,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
member of the Russian Academy of Sciences,
academician-secretary of the Department of Agricultural
Sciences the Russian Academy of Sciences,
e-mail: vim@vim.ru;

Denis A. Mironov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Anastasiya V. Mironova,
researcher,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The efficiency of agricultural machine and tool operation is noted to significantly depend on the characteristics of the working bodies. The paper emphasizes the importance of working bodies' reliability and operating lifetime which largely depend on wear resistance, strength, as well as design features. (*Research purpose*) To substantiate the choice of effective modern directions to increase the operating lifetime of wearable agricultural machine working bodies, the choice of types and characteristics of the

materials used and technological methods for their hardening. (*Materials and methods*) The many years' experience of the FNAC VIM in this area has been studied. A concept analysis of the relevant technical information has been conducted. (*Results and discussion*) The basics and conditions of abrasive wear of agricultural machinery parts are presented. The concept of "structural wear resistance" is clarified. The paper analyzes the materials (steels, hard alloys) of the working bodies of the agricultural machines used in Russia and abroad. Their main comparative physical and mechanical characteristics are pointed out. A method is proposed for selecting basic design parameters based on the strength characteristics of the materials used. Surfacing technologies for hardening the agricultural machine working bodies are compared. The paper substantiates the most effective technological options, individual technical and economic parameters, recommendations for the use of materials. (*Conclusions*) It is proved that the use of surfacing technologies leads to a 1.5-4.5-times increase in the operating lifetime of working bodies and significant economic efficiency.

Keywords: working bodies, wear resistance, operating lifetime of working bodies, hard alloys, steels, hardening technologies, surfacing technologies, economic efficiency.

■ **For citation:** Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Osnovnye napravleniya povysheniya resursa bystroiznashivaemykh rabochnik organov sel'skokhozyaystvennykh mashin [Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50. EDN IEUNKO.

При проведении подготовительных операций для обработки почвы, посевов, ухода за ними и уборки механизированные сельскохозяйственные орудия и рабочие органы подвергаются жесткому абразивному воздействию. Функциональные нарушения в работе сельхозмашин, обусловленные износом деталей, лимитируют длительность эксплуатации. Затраты на ремонт, замену изношенных изделий, а также расходы, связанные с потерями урожайности вследствие вынужденных простоев, некачественной работой изношенных деталей составляют одну из крупнейших статей в сметной стоимости производства сельхозкультур [1].

Обеспечение высокой износостойкости деталей – обязательное условие надежной работы сельхозмашин и получения максимального экономического эффекта от их применения, поскольку именно вследствие износа теряется работоспособность 80-90% подвижных элементов и рабочих органов сельскохозяйственных орудий [2].

Среди различных видов изнашивания деталей наиболее распространено абразивное, когда твердые частицы разрушают поверхностный слой деталей. С изысканием способов повышения сопротивления абразивному изнашиванию связано обеспечение оптимальной долговечности большинства машин и оборудования, применяемых в сельском хозяйстве (рис. 1) [3, 4].

Различают восемь типичных закономерностей абразивного изнашивания конструктивных разновидностей деталей (рис. 1). Самый простой закон изнашивания – линейный (тип I).

При известном предельном износе W_n легко подсчитать срок службы детали:

$$T_d = W_n / K,$$

где K – переходный коэффициент, характеризуемый углом наклона прямой на графике.

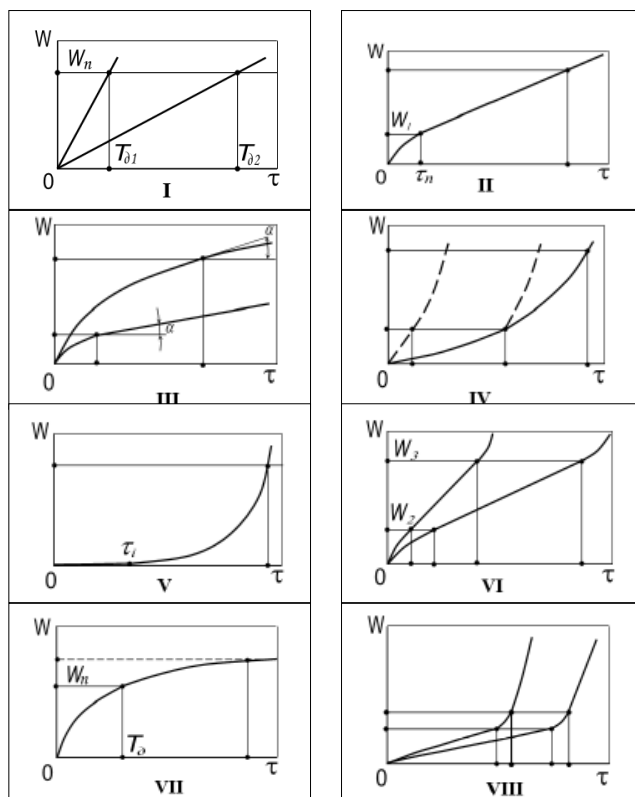


Рис. 1. Типовые графики динамики изнашивания: τ – наработка на изделие (мотор-часы, гектары, обороты); W – величина износа (мм, см); τ_n : T_d – период приработки; W_1, W_2, W_3 – критические точки, характеризующие изменения ускорения параметров изнашивания; W_n – предельно допустимые износы
Fig 1. Typical graphs of wear dynamics; τ is the mean time to failure (motor-hours, hectares, revolutions); W is the amount of wear (mm, cm); τ_n : T_d is running-in period; W_1, W_2, W_3 are critical points characterizing changes in the acceleration of wear parameters; W_n - maximum permissible wear

Такая закономерность изнашивания характерна, например, для отвалов плугов, гидротранспортных

устройств. Износ этих элементов не сопровождается существенным изменением условий их эксплуатации, что объясняет постоянство скорости изнашивания.

Закон динамики изнашивания II типа характеризуется периодом приработки длительностью τ_n и последующим стабильным характером изнашивания (шарниры, подшипники скольжения, некоторые двухслойные детали, склонные к относительно устойчивому самозатачиванию).

Монотонное и непрерывно продолжающееся до предельного износа W_n снижение скорости изнашивания наблюдается у монометаллических не самозатачивающихся деталей и инструментов, шестеренок и др. (рис. 1, тип III).

Прогрессирующее увеличение скорости изнашивания отражает отрицательное влияние износа на условия трения деталей, например в гусеничных цепях (рис. 1, тип IV).

График динамики изнашивания V типа характеризуется периодом (0- τ_i) отсутствия износа с последующим возрастанием скорости изнашивания. Обычно это происходит при наличии латентного (скрытого) периода в процессе изнашивания; при появлении динамических нагрузок вследствие роста зазоров (подшипники скольжения с пылезащитными уплотнениями).

График VI иллюстрирует изменение ускорения изнашивания при значениях износов W_2 и W_3 , имеющих место при изменении внешних условий работы детали (например, механического состава или твердости почвы и др.).

Для динамики изнашивания деталей с пружинным нагружением характерен вид зависимости типа графика VII.

Тип VIII отражает изнашивание деталей с изменяющимися свойствами их материалов по глубине, например цементированных, с послойным изменением износостойкости материала [5].

Распространенность абразивного изнашивания обусловлена не только тем, что многие детали машин, их рабочие органы и инструмент по характеру выполняемых функций неизбежно соприкасаются с материалами, способными вызвать абразивный процесс изнашивания (почвой, грунтом, растительной массой и др.). Абразивное изнашивание подавляет менее интенсивные процессы изнашивания деталей и в тех случаях, когда контакт с посторонними твердыми частицами не связан с работой машины, а обусловлен загрязненностью среды, поскольку практически крайне сложно полностью исключить загрязненность твердыми частицами окружающего воздуха, воды, смазочных материалов, горючего и различных технологических сред, контактирующих с трущимися поверхностями деталей сельскохозяйственных машин [6].

Цель исследования – обосновать выбор современных эффективных направлений для повышения

ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин, а также видов и характеристик применяемых материалов и технологических способов их упрочнения.

МАТЕРИАЛАМИ И МЕТОДЫ. Рабочие органы сельскохозяйственных машин разнообразны: лемехи, отвалы, полевые доски плугов; лапы, наральники, долоты культиваторов; диски борон, луцильщиков, дисковых плугов; лезвия, диски сошников посевных и посадочных машин; лемехи и ножи различных овощеуборочных машин; сегменты, бичи, ножи и противорежущие бруссы зерноуборочных и кормоуборочных машин; распылители ядохимикатов машин для защиты растений и др. (рис. 2). Рабочий орган существенно влияет на качество технологического процесса, его энергоемкость, а также в значительной мере определяет характеристики надежности машины.

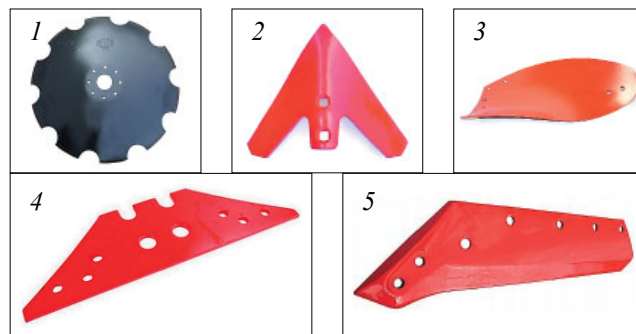


Рис. 2. Основные рабочие органы сельскохозяйственных машин: 1 – диск бороны; 2 – лапа культиватора; 3 – полевая доска; 4 – отвал; 5 – лемех для плугов

Fig. 2. The main working bodies of agricultural machines: 1 – harrow disc; 2 – cultivator paw; 3 – field board; 4 – dump; 5 – ploughshare

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При выборе материалов рабочих органов необходимо учитывать следующие основные факторы:

- прочность;
- упругие, пластические, ударные свойства;
- износостойкость собственно материала, плотность;
- коррозионную стойкость;
- возможность использования материалов с целью повышения «конструкционной износостойкости»;
- экономический;
- технологический и др.

Наиболее значимые из них – прочность и износостойкость [7, 8].

Понятие «конструкционной износостойкости» включает в себя не только износостойкость материала, но и конструктивные особенности детали. Изготовление из материала высокой износостойкости – не достаточное условие длительного срока службы. Конструкционная износостойкость определяется значением и характером распределения давлений, эффек-

Таблица 1

Table 1

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАРОК СТАЛЕЙ В РОССИИ
CHEMICAL COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL GRADES IN RUSSIA

Сталь Steel	Химический состав, масс.% / Chemical composition, wt. %					Твердость, HRC Hardness HRC	Предел прочности, МПа Ultimate tensile strength, MPa	δ , %
	C	Si	Mn	Cr	прочие other			
45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,50-0,80	до 0,25	—	39-43	850-1000	7-8
40X	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	Ni – до 0,30 Cu – 0,30	41-45	1150-1350	6-7
Л53	0,44-0,52	0,17-0,37	0,50-0,80	до 0,25	—	40-44	900-1150	6-7
65Г	0,62-0,70	0,17-0,37	0,90-1,2	до 0,25	—	38-42	1000-1180	6-7
60С2	0,57-0,65	1,50-2,00	0,60-0,90	до 0,30	Ni – до 0,25 Cu – 0,20	41-45	1150-1350	6-7
30ХГСА	0,28-0,34	0,90-1,20	0,80-1,10	0,80-1,10	Ni – до 0,30 Cu – 0,30	46-50	1480-1610	7-8

тивностью смазывания, количеством и размерами твердых частиц в контакте трущихся деталей, распределением износа по рабочим поверхностям и многими другими факторами, зависящими от конструкции детали [5].

Помимо выбора конструкции и материалов используют также двухслойные лезвия, упрочняют наиболее изнашиваемые поверхности твердыми сплавами и др [9, 10].

В качестве материала основы рабочих органов сельхозмашин в крупносерийном производстве в России применяют в основном стали марок 45; 40X; Л53; 65Г; 60С2; 30ХГСА (табл. 1) [11].

В Европе режущие рабочие органы почвообрабатывающих и уборочных машин производят из более прочных легированных сталей, имеющих временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_b = 1600-2000$ МПа и соответствующую рабочую твердость (табл. 2) [11].

В Германии, Норвегии для изготовления нагруженных рабочих органов сталь дополнительно легируют титаном, ниобием и другими элементами.

В России имеются аналогичные разработки легированных борсодержащих сталей 30Г2Р или 25Х-ТЮР, но в широком серийном производстве металлургического листового проката по ряду причин, имеющих в основном организационно-экономическую основу, их пока нет. Новейшие разработки высокопрочных износостойких полностью конкурентоспособных борсодержащих сталей для высоконагруженных рабочих органов сельхозмашин проведены сотрудниками ЦНИИ КМ «Прометей» при участии ученых ФНАЦ ВИМ (табл. 3) [1, 12]. Высоколегированные стали различаются уровнем прочности.

Изучили относительную износостойкость и твердость различных сталей для изготовления рабочих органов сельхозмашин машин (табл. 4) [12].

Таблица 2

Table 2

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛЕЙ ЗА РУБЕЖОМ / CHEMICAL COMPOSITION AND HARDNESS OF STEELS ABROAD

Сталь Steel	Содержание элементов ¹ , % (масс.) / Composition of the elements ¹ , % (wt.)							Твердость, HRC Hardness HRC
	C	Si (max)	Mn	P (max)	S (max)	Cr	B ²	
20MnB4	0,17-0,23	0,40	0,70-1,30	0,035	0,040	—	0,0008-0,0050	41-47
20MnB5	0,17-0,23	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	—	0,0008-0,0050	41-45
30MnB5	0,27-0,33	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	—	0,0008-0,0050	47-53
35MnB4	0,32-0,38	0,40	0,70-1,30	0,035	0,040	—	0,0008-0,0050	51-57
35MnB5	0,32-0,38	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	—	0,0008-0,0050	50-56
39MnB5	0,36-0,42	0,40	1,00-1,60	0,035	0,040	—	0,0008-0,0050	53-59
27MnCrB5-2	0,24-0,30	0,40	1,10-1,50	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	47-53
34MnCrB5-2	0,31-0,37	0,40	1,10-1,50	0,035	0,040	0,85-1,25	0,0008-0,0050	50-56
34CrB4	0,31-0,37	0,40	0,50-0,90	0,035	0,040	0,85-1,25	0,0008-0,0050	50-56
40MnCrB4-2	0,37-0,43	0,40	0,70-1,10	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	53-59
39MnCrB6-2	0,36-0,42	0,40	1,35-1,5	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	53-59
45MnCrB4-2	0,42-0,48	0,40	0,70-1,10	0,035	0,040	0,30-0,70	0,0008-0,0050	56-62

¹ В сталях присутствуют в небольших количествах определенные элементы, которые следует рассматривать как примеси: 0,40% Cu; 0,08% Mg, 0,30% Ni. / Steels contain small amounts of certain elements, which should be considered impurities: 0,40% Cu; 0,08% Mg, 0,30% Ni.

² Содержание бора вплоть до 0,0005 % считается приемлемым, если требования к закаливанию еще актуальны / Boron content up to 0,0005% is considered acceptable if the hardening requirements are still valid.

Таблица 3

Table 3

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПЫТНЫХ ПАРТИЙ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗМАШИН**
**CHEMICAL COMPOSITION AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PILOT BATCHES OF METAL ROLLING FOR THE PRODUCTION
OF WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINES**

Марка металлопроката Rolled metal mode	Плавка Smelting	Химический состав, мас.% / Chemical composition, wt. %							Углеродный эквивалент, % Carbon equivalent, %	Предел прочности, МПа Ultimate tensile strength, MPa	Содержание лигирующих элементов, % Content of alloying elements, %	Твердость, <i>HRC</i> Hardness, <i>HRC</i>	
		<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn + Ni + Cu</i>	<i>Cr + Mo</i>	<i>Ti + V + Nb</i>	<i>Al</i>	<i>Ca</i>					<i>B</i>
Б 1200	1	0,30	0,10– 0,45	1,60	0,60	0,09	–	0,03	0,003	0,63	1410	10,8	46-48
	2	0,35		1,60	0,59	0,08	0,01			0,68	1480	9,5	47-49
Б 1500	3	0,37		2,06	1,15	0,06	–			0,83	1720	9,0	50-52
	4	0,39		2,17	1,18	0,07	0,06			0,87	1780	8,5	51-53
Б 1700	5	0,45		2,43	1,66	0,11	–			1,07	2060	8,0	54-58

При проведении в ФНАЦ ВИМ эксплуатационно-ресурсных сравнительных испытаний рабочих органов сельхозмашин, изготовленных из опытных сталей Б1500 и Б1700, выявлено преимущество до 15% по характеристикам износостойкости в сравнении с аналогами из ведущих зарубежных фирм *Lemken* (ФРГ) и *Kuhn* (Франция).

Применение сталей повышенной прочности позволяет изготавливать рабочие органы из проката уменьшенной (до 30%) толщины, что существенно снижает металлоемкость сельхозмашин, а также создает возможность повышения ресурса деталей к критериям предельных состояний, например затуплению режущей кромки.

Толщину листа материала рабочего органа (*B*) следует выбрать исходя из данных по нагрузкам, действующим на деталь, и прочностных характеристик используемого материала. В качестве примера приведем методику Сидорова С.А. для определения тол-

щины материалов основы нагруженных рабочих органов почвообрабатывающих машин [13].

Толщина листа рабочего органа определяется по обобщенной эмпирической зависимости, имеющей вид гиперболической функции:

$$B \geq \frac{A + c \cdot \sigma_B}{\mu \cdot \sigma_B} \sum F_{x \max}, \text{ мм},$$

где σ_B – предел прочности стали, МПа;

$$\Sigma F_{x \max} = (1,6 \dots 2,3) \cdot \Sigma F_{cp.x};$$

$\Sigma F_{x \max}$ – максимальное тяговое сопротивление, действующее в обычных условиях на рабочий орган (корпус плуга, лапу культиватора, диск бороны и др.), Н;

$\Sigma F_{cp.x}$ – усредненное почвенное тяговое сопротивление рабочего органа, Н;

A , мм·МПа/Н; c , мм/Н; μ – постоянные эмпирические коэффициенты (табл. 5).

Приведем упрощенную формулу, определяющую

Таблица 4

Table 4

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК МЕТАЛЛОПРОКАТА,
ИСПОЛЗУЕМОГО В ПРОИЗВОДСТВЕ НАГРУЖЕННЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗМАШИН**
WEAR RESISTANCE OF VARIOUS GRADES OF ROLLED METAL USED IN THE PRODUCTION OF LOADED WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINES

Сталь Steel	Твердость, HRC Hardness, HRC	Коэффициент относительной износостойкости материала (при различном уровне нагрузки) Relative wear resistance coefficient of the material (at different load levels)
45 (эталон / benchmark)	40-43	1,00
65Г	38-41	1,07-1,09
30ХГСА	45-50	1,04-1,06
Импортная типа 30MnB5 / Imported type 30MnB5	52-53	1,47-1,53
Опытная Б 1200 / Experimental Б 1200	46-48	1,18-1,21
Опытная Б 1500 / Experimental Б 1500	50-53	1,50-1,56
Опытная Б 1700 / Experimental Б 1700	54-58	1,68-1,78

Таблица 5

Table 5

ЭМПИРИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ЗАВИСИМОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ТОЛЩИНУ ЛИСТА МАТЕРИАЛА ЛЕЗВИЙНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
EMPIRICAL COEFFICIENTS FOR THE DEPENDENCE THAT DETERMINES THE SHEET THICKNESS OF THE MATERIAL FOR THE BLADE WORKING BODIES

Виды рабочего органа / Types of working bodies	A, мм·МПа/Н	c, мм/Н	μ
Лемех плуга (цельный) / Ploughshare (solid)	2,5	0,002	5
Лемех плуга с накладным или приставным долотом Ploughshare with overhead or attached chisel: лемех / ploughshare долото / bit	2,5 2,5	0,002 0,002	6 4
Отвал плуга (грудь и крыло) / Plough blade (chest and wing)	2,5	0,002	10
Стрельчатая лапа культиватора / Cultivator's wing share	2,5	0,002	1
Сферический диск тяжелой бороны, дискатора, лесного дискового культиватора Concave disc of a heavy harrow, disc harrow, forest disc cultivator	2,5	0,002	1,3
Сферический диск луцильника и полевой бороны Concave disc cultivator and field harrow	2,5	0,004	1

толщину места лезвийного почворезущего рабочего органа в зависимости не от тягового сопротивления ($\Sigma F_{x \max}$), а от действующего на наиболее нагруженную часть детали почвенного удельного контактно-го давления ($P_{уд}$).

$$B \geq (0,01 \dots 0,013) \left[\frac{\text{мм}}{\text{МПа}^2} \right] \cdot P_{уд} [\text{МПа}] \cdot \sigma_v [\text{МПа}]; \text{ мм.}$$

Для различных типов изделий и почвенно-эксплуатационных условий $\Sigma F_{x \max}$ обычно находится в пределах 800-8000 Н, а $P_{уд}$ – 0,08-0,90 МПа.

С целью более существенного повышения износостойкости и срока службы многие рабочие органы сельхозмашин упрочняются, а иногда восстанавливаются различными видами износостойких твердосплавных покрытий. Как уже отмечалось, важны не

только повышение износостойкости материала детали, но и конструктивные особенности нанесения износостойкого покрытия, которые в процессе изнашивания обеспечат детали дополнительное увеличение ресурса, то есть повышение «конструкционной износостойкости» [14, 15].

Наибольшее распространение нанесение твердых сплавов получило в производстве лезвийных рабочих органов почвообрабатывающих, кормо-, овощеуборочных и посевных машин. Двухслойные лезвия с твердосплавным покрытием в процессе эксплуатации имеют повышенную линейную износостойкость и лучшую форму лезвия. Иногда процесс изнашивания (формообразования) двухслойного лезвия называют «самозатачиванием». По мнению авторов, пра-

Таблица 6

Table 6

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОРОШКОВЫЕ СПЛАВЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РФ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗМАШИН
WEAR-RESISTANT POWDER ALLOYS USED IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR HARDENING AGRICULTURAL MACHINERY PARTS

Марки твердого сплава Hard alloy grades	Среднее содержание элементов, % / Average content of elements, %								Средняя твердость HRC Mean hardness. HRC	Коэффициент относительной износостойкости в абразивной среде (относительно стали 45) Relative wear resistance coefficient in abrasive environment (with regard to steel 45)	
	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>B</i>	<i>W</i>	<i>Fe</i>			другие элементы Other elements
ПГ-С27	3,9	26,0	1,7	1,5	1,1	–	0,3	остальное the rest	<i>Mo</i> 0,1	55,5	3,3-3,7
ПГ-УС25	4,9	38,0	1,4	2,1	2,5	–	–		–	56,5	3,6-4,1
ПГ-ФБХ-6-2	4,5	34,0	–	1,7	2,7	1,7	–		–	58,0	4,2-4,7
ПР-ФМИ	3,5	–	–	2,5	12,0	3,0	–		–	56,0	4,0-4,4
ПС-14-60	4,8	35,7	1,3	2,5	0,7	0,2	–		<i>Cu</i> 0,8	57,0	3,4-3,8
Релит «3» (cast tungsten carbide, <i>WC</i>)	3,8	–	–	–	–	–	96,1	0,15	–	–	–
ПГ-10Н-01	0,8	17,0	осталь- ное	4,3	–	3,5	–	5	–	60,0	2,9-3,4
ПГ-СР4	0,8	16,5		3,7	–	3,3	–	–	–	60,0	3,0-3,5
ПР-Н67Х18-С5Р4	1,2	17,5		–	4,5	–	4,3	–	–	62,0	3,2-3,7

вильнее классифицировать этот процесс как уменьшение темпов затупления или улучшение условий формообразования лезвия [16, 17].

Нанесение износостойких покрытий позволяет на практике повысить ресурс рабочих органов сельхозмашин в 1,5-4,5 раза.

При упрочнении и восстановлении деталей сельхозмашин в России применяют относительно дешевые твердые сплавы на основе высоколегированных чугунов ПГ-С27, ПГ-УС25, ПГ-ФБХ-6-2, ПР-ФМИ, ПС-14-60 и, несколько реже, сплавы с добавками «рз-лита зернового» и самофлюсующиеся сплавы ПР-Н67Х18С5Р4, ПГ-СР4, ПГ-10Н-01 на никелевой основе (табл. 6).

В ФНАЦ ВИМ в сотрудничестве с НИТУ МИСиС ведутся разработки новых твердых сплавов, в основном с увеличенным содержанием бора, марганца и добавками литого карбида вольфрама (WC) [10, 12].

За рубежом наибольшее применение имеют сплавы с содержанием литого карбида вольфрама. Рабочие органы сельхозмашин упрочняют также сплавами на кобальто-никелевой основе, имеющими в своем составе 1,4-2,7% углерода, 1,0-1,6% кремния, 25-33% хрома, 11-18% вольфрама (Австрия, Венгрия, Швейцария и др.).

В сельскохозяйственном машиностроении России используются главным образом наплавочные методы нанесения твердосплавных покрытий. Это объясняется необходимостью высокой адгезии покрытия с основой в связи с тяжелыми условиями эксплуатации большинства деталей. Методы напыления имеют ограниченное применение. Наиболее распространена индукционная наплавка твердых сплавов. При этом методе используется нагрев изделия и сплава токами высокой частоты (ТВЧ). К преимуществам индукционной наплавки следует отнести простоту в обслуживании и высокую производительность. Но индукционная наплавка имеет также существенные недостатки, которые в ряде случаев не позволяют добиться требуемых параметров и качества упрочнения [4, 15].

Наплавка ТВЧ имеет большие технологические ограничения по толщине наносимых материалов (не более 1,5-1,7 мм) и их химическому составу. Индукционная наплавка рабочих органов, имеющих сложные геометрические поверхности, затруднена или невозможна. При индукционной наплавке основной металл и твердый сплав часто перегреваются, что негативно сказывается на их свойствах.

Более перспективны дуговые способы наплавки твердых сплавов, в частности разработанная в России разновидность плазменной дуговой наплавки – высокопроизводительная экономичная технология (рис. 3) [18]. В плазменную ионизированную дугу транспортирующим и защитным газом подается порошок и наплавляется на деталь. С помощью вибратора плазмоторн имеет возможность колебаться. По-

крытия наносятся различной ширины (до 35 мм). Отсутствуют ограничения по химическому составу и свойствам наносимых плазмой материалов.

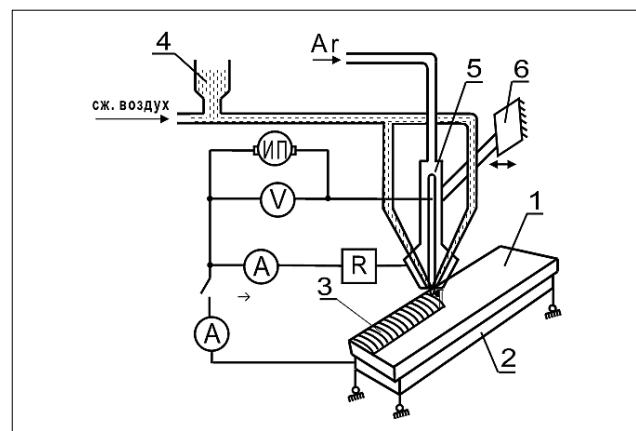


Рис. 3. Принципиальная схема установки плазменной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин: 1 – наплавляемая деталь; 2 – механизм перемещения; 3 – наплавленный слой; 4 – дозатор; 5 – водоохлаждаемый плазмоторн; 6 – вибратор; ИП – источник питания; R – балластный реостат (сопротивление)

Fig. 3. Schematic installation diagram for plasma surfacing of agricultural machine working bodies: 1 – welded part; 2 – movement mechanism; 3 – deposited layer; 4 – dispenser; 5 – water-cooled plasma torch; 6 – vibrator; ИП – power supply; R – ballast rheostat (resistance)

В отличие от известной технологии плазменной наплавки в среде аргона, при разработанной новой технологии этот газ используется только для плазмообразования (рис. 3). Ввиду того, что в сравнении с аргоном воздух является более теплотворным газом, удастся повысить энергетическую эффективность процесса наплавки, увеличить сварочно-наплавочную скорость в 2,0-2,5 раза, сократить расход относительно дорогого аргона в 3,5-4,5 раза. В сравнении с наплавкой в среде аргона себестоимость нанесения покрытий в среде сжатого воздуха ниже в 2,3-2,6 раза. Данный факт и позволяет достаточно широко использовать представленный метод для упрочнения различных типов рабочих органов сельхозмашин (рис. 4).

Качество наплавки в среде воздуха несколько ниже в сравнении со стандартной технологией плазменной наплавки в среде аргона. С учетом использования новых технологических приемов, в частности изменения в конструкции плазмоторна, добавок в сплавы раскислителей для деталей сельхозмашин, эксплуатирующихся в жестких абразивных средах, качество наплавки приемлемое (рис. 4). По физико-механическим характеристикам нанесение покрытия уступает наплавке в аргоне не более 5-8%, при значительном экономическом выигрыше. Толщина наносимых в среде сжатого воздуха покрытий составляет 0,4-5,5 мм за один проход.

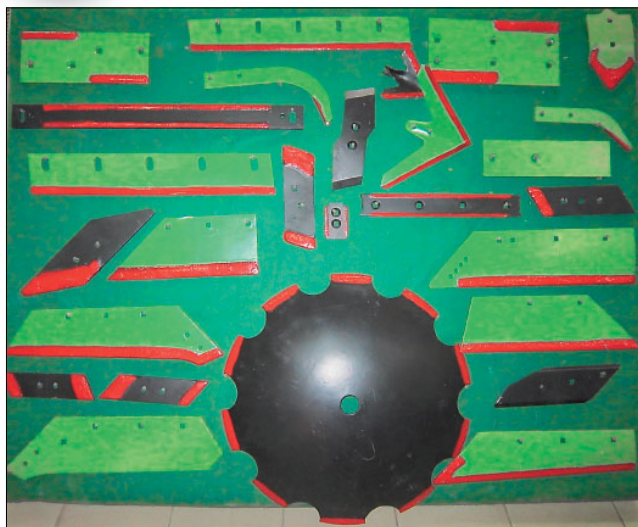


Рис. 4. Виды рабочих органов с упрочняющими твердосплавными покрытиями, наносимыми плазменной наплавкой в среде сжатого воздуха, изготавливаемые из высокопрочных сталей (30ХГСА, 30MnB5 и др.) мелкими сериями в ФНАЦ ВИМ
Fig. 4. Types of working bodies with hardening hard-alloy coatings applied by plasma surfacing in compressed air, and made of high-strength steels (30KhGSA, 30MnV5, etc.) in small batches at the FNAC VIM

Перспективный способ упрочнения отдельных деталей почвообрабатывающих машин (наральников культиваторов, носков лемехов плугов и др.) – наплавка «наморачиванием» (окунанием).

В опытно, мелкосерийном производстве и при восстановлении деталей сельскохозяйственных машин применяют и другие методы нанесения покрытий: газоплазменную, электродуговую, лазерную, электронно-лучевую наплавку, напыление самофлюсующихся сплавов с последующим оплавлением, гальваническое хромирование.

По данным ФНАЦ ВИМ, экономический эффект от применения в России упрочняющих наплавочных технологий в нагруженных деталях сельхозмашин непосредственно в сельскохозяйственном производстве составляет 18-57% от цены серийных неупрочненных аналогов в год, при рентабельности производства упрочненных изделий 25-35%.

Перспективным направлением последующих исследований считаем проведение лабораторных стендовых испытаний контрольных образцов материалов, используемых для изготовления и упрочнения рабочих органов. Будут проведены экспериментальные исследования рабочих органов сельхозмашин, упрочненных разработанным методом в реальных почвенных условиях.

Выводы. Основное направление повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин – использование при их изготовлении высокопрочных сталей и упрочняющих, преимущественно наплавочных технологий в сочетании с обоснованием конструктивных параметров как собственно детали, так и упрочняющих слоев. Это обеспечивает не только линейную, но и «конструкционную» износостойкость. Упрочняющие технологии и современные наплавочные материалы твердосплавных покрытий позволяют повысить ресурс деталей сельхозмашин в сравнении с их монометаллическими аналогами в 1,5-4,5 раза.

Рекомендуется для производства рабочих органов сельхозмашин использовать низко- и среднеуглеродистые (0,25-0,45%) легированные бором, хромом и другими элементами стали с пределом прочности 1600-2100 МПа и относительным удлинением не ниже 7% с обоснованным выбором толщины листа материала детали.

В качестве упрочнения на детали сельхозмашин рекомендуется наносить относительно недорогие твердосплавные материалы на железной основе с содержанием 22-37% порошкового литого карбида вольфрама.

С эксплуатационной и экономической стороны наиболее эффективны дуговые способы наплавочного нанесения твердосплавных покрытий, в частности плазменная дуговая наплавка в среде сжатого воздуха. Толщина наплавленного слоя находится в пределах 0,4-5,5 мм. Экономическая эффективность использования упрочненных наплавленных деталей сельхозмашин в сравнении с неупрочненными в сельскохозяйственном производстве составляет 18-57% от цены серийного базового неупрочненного аналога в год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Миронова А.В., Рябов В.В. Повышение износостойкости и других ресурсных характеристик материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Металлург*. 2021. №5. С. 93-99.
2. Панов А.И., Пляка В.И., Лискин И.В., Миронова А.В. Закономерности изнашивания лезвий почвообрабатывающих рабочих органов // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2020. №1(95). С. 19-24.
3. Миронов Д.А., Сидоров С.А., Лискин И.В. Прочностные и ресурсные характеристики почворезущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 39-43.
4. Измайлов А.Ю., Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Хо-рошенков В.К., Хлусова Е.И., Рябов В.В. Новые материалы и технологии нанесения твердосплавных покрытий для деталей почвообрабатывающих машин // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2016. №2. С. 66-69.

5. Сидоров С.А., Зволинский В.Н. Повышение прочностных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин путем защиты определенных зон от интенсивного абразивного изнашивания // *Технический сервис машин*. 2019. N1(134). С. 179-193.
6. Сурус А.И., Блохин А.В., Лось А.М. Повышение эксплуатационных характеристик деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях повышенного износа и коррозии // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2017. N1(16). С. 103-109.
7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Миронов Д.А., Хорошенков В.К., Сидоров С.А. Повышение конструкционной прочности рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018. N3. С. 57-60.
8. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Хорошенков В.К., Хлусова Е.И. Наплавочные методы повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельхозмашин // *Сварочное производство*. 2015. N10. С. 35-40.
9. Дудников А.А., Беловод А.И., Пасюта А.Г., Келемеш А.А., Горбенко А.В. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. N5/1(25). С. 4-7.
10. Sidorov S.A., Lobachevskii Y.P., Khoroshenkov V.K., Akhmedova T.S., Vorob'ev D.A. Wear and breakage resistance of hard alloy coatings strengthened with tungsten carbide. *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. N11-12. 1023-1028.
11. Соловьев С.А., Иванайский В.В., Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Лялякин В.П., Аулов В.Ф. Износостойкие композиционные покрытия для рабочих органов сельхозмашин. М.: РАН. 2019. 187 с.
12. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I., Ryabov V.V. Novel high-alloy boron-containing steels for driven elements of tilling machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. Vol. 59. N3-4. 208-210.
13. Сидоров С.А. Методика расчета рабочих органов почвообрабатывающих машин на прочность // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2008. N12. С. 39-40.
14. Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Золотарев А.С. Влияние геометрических и установочных параметров плужных рабочих органов на агротехнические и силовые характеристики // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 10-16.
15. Ожегов Н.М., Добринов А.В., Ружьев В.А. Исследования методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. N3. С. 28-31.
16. Лискин И.В., Алдошин Н.В., Горбачев И.В., Панов А.И. Совершенствование конструкции плужных лемехов с накладным долотом // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2018. N1(83). С. 15-19.
17. Лискин И.В., Панов А.И., Горбачев И.В. результаты испытаний лемехов с накладным долотом // *Сельский механизатор*. 2017. N 5. С. 8-9.
18. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Y.P., Akhmedova T.S. Improving wear resistance of agricultural machine components by applying hard-alloy thick-layer coatings using plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. N11-12. 1290-1294.

REFERENCES

1. Sidorov S.A., Mironov D.A., Mironova A.V., Ryabov V.V. Povyshenie iznosostoykosti i drugikh resursnykh kharakteristik materialov rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Increase of wear resistance and other resource characteristics of materials of working bodies of tillage machines]. *Metallurg*. 2021. N5. 93-99 (In Russian).
2. Panov A.I., Plyaka V.I., Liskin I.V., Mironova A.V. Zakonomernosti iznashivaniya lezviy pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov [Wear patterns of soil cutting blades]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2020. N1(95). 19-24 (In Russian).
3. Mironov D.A., Sidorov S.A., Liskin I.V. Prochnostnye i resursnye kharakteristiki pochvovrezhushchikh rabochikh organov [Strength and Durability Characteristics of Soil-Cutting Working Tools]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N3. 39-43 (In Russian).
4. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I., Ryabov V.V. Novye materialy i tekhnologii naneseniya tverdosplavnykh pokrytiy dlya detaley pochvoobrabatyvayushchikh mashin [New materials and technologies for placing hard alloy covers for details of soil tillers]. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2016. N2. 66-69 (In Russian).
5. Sidorov S.A., Zvolinskiy V.N. Povyshenie prochnostnykh kharakteristik rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin putem zashchity opredelennykh zon ot intensivnogo abrazivnogo iznashivaniya [Improving the strength characteristics of the working tillage machinery organs by protecting certain areas from intense abrasive wears]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N1(134). 179-193 (In Russian).
6. Surus A.I., Blokhin A.V., Los' A.M. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley sel'skokhozyaystvennykh mashin, rabotayushchikh v usloviyakh povyshennogo iznosa i korrozii [Improving the performance of parts of agricultural machines, working in conditions of high wear and corrosion resistance]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2017.

- N1(16). 103-109 (In Russian).
7. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Sidorov S.A. Povyshenie konstruktivnoy prochnosti rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Increasing the structural strength of tillage machine working bodies]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2018. N3. 57-60 (In Russian).
 8. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Naplavochnye metody povysheniya resursa bystroiznashivaemykh rabochikh organov sel'khoz mashin [Surfacing methods for increasing the durability of agricultural machine working bodies]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2015. N10. 35-40 (In Russian).
 9. Dudnikov A.A., Belovod A.I., Pasyuta A.G., Kelemesh A.A., Gorbenco A.V. Tekhnologicheskie sposoby povysheniya dolgovechnosti i resursa rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Techniques to increase the durability and working life of tillage machine working bodies]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*. 2015. N5/1(25). 4-7 (In Russian).
 10. Sidorov S.A., Lobachevskii Y.P., Khoroshenkov V.K., Akhmedova T.S., Vorob'ev D.A. Wear and breakage resistance of hard alloy coatings strengthened with tungsten carbide. *Metalurgist*. 2018. Vol. 61. N11-12. 1023-1028 (In English).
 11. Solov'ev S.A., Ivanayskiy V.V., Ishkov A.V., Krivochurov N.T., Lyalyakin V.P., Aulov V.F. Iznosostoykie kompozitsionnye pokrytiya dlya rabochikh organov sel'khoz mashin [Wear-resistant composite coatings for agricultural machine working bodies of]. Moscow: RAN. 2019. 187 (In Russian).
 12. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I., Ryabov V.V. Novel high-alloy boron-containing steels for driven elements of tilling machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. Vol. 59. N3-4. 208-210 (In English).
 13. Sidorov S.A. Metodika rascheta rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin na prochnost' [Stress calculation method for tillage machine working bodies]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennye mashiny*. 2008. N12. 39-40 (In Russian).
 14. Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Zolotarev A.S. Vliyanie geometricheskikh i ustanovochnykh parametrov pluzhnykh rabochikh organov na agrotekhnicheskie i silovye kharakteristiki [Influence of geometric and setup parameters of the arrangement of working tools on agrotechnical and power characteristicS]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 10-16 (In Russian).
 15. Ozhegov N.M., Dobrinov A.V., Ruzh'ev V.A. Issledovaniya metodov uprochneniya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin i razrabotka avtomaticheskoy ustanovki dlya naneseniya na nikh uprochnyayushchikh pokrytiy [Investigations of methods of strengthening the working organs of tillage machines and the development of an automatic plant for applying hardening coatings on them]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2017. N3. 28-31 (In Russian).
 16. Liskin I.V., Aldoshin N.V., Gorbachev I.V., Panov A.I. Sovershenstvovanie konstruktсии pluzhnykh lemekhov s nakladnym dolotom [Improving the design of ploughshares with a composite chisel]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2018. N1(83). 15-19 (In Russian).
 17. Liskin I.V., Panov A.I., Gorbachev I.V. Rezul'taty ispytaniy lemekhov s nakladnym dolotom [Test results for shares with overhead chisel]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. N 5. 8-9 (In Russian).
 18. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Y.P., Akhmedova T.S. Improving wear resistance of agricultural machine components by applying hard-alloy thick-layer coatings using plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. N11-12. 1290-1294 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Лобачевский Я.П. – научное руководство, формирование основных направлений исследования;
Миронов Д.А. – сбор и анализ аналитических и практических материалов, формирование общих выводов;
Миронова А.В. – анализ научных источников по теме исследования, доработка текста.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Lobachevskiy Ya.P. – scientific supervision, overall research design;
Mironov D.A. – data collection and analysis, drawing general conclusions;
Mironova A.V. – analysis of scientific sources on the research topic, manuscript revision.
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

15.12.2022
20.02.2023