

EDN: CQSIWN

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-53-63

Научная статья
УДК 669.781: 539.538

Противоизносные характеристики железоуглеродистых твердосплавных покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин

Яков Петрович Лобачевский¹,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН,
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Денис Александрович Миронов²,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: mironov-denis87@mail.ru

¹Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Разработка новых износостойких твердосплавных композиций для наплавочного упрочнения изделий, эксплуатируемых в жестко абразивных средах, в частности почве, является одним из эффективных направлений борьбы с абразивным износом и его последствиями. Серийно выпускаемые железоуглеродистые твердые сплавы имеют невысокие характеристики сопротивления абразивному изнашиванию. (*Цель исследования*) Разработка новых твердых сплавов на основе высоколегированных чугунов, обеспечивающих повышение износостойкости и эффективности применения упрочняющих наплавочных покрытий на быстроизнашиваемые детали почвообрабатывающей техники. (*Материалы и методы*) Априорный анализ показал, что увеличенное содержание бора повышает, как правило, сопротивляемость сталей и твердых сплавов абразивному изнашиванию. Отмечена сложность и недостаточная изученность влияния легирования бором, в частности железоуглеродистых твердых сплавов. По результатам предшествующих исследований приведены рекомендуемые граничные пределы содержания бора в сплавах – 0,5-6,0 процента. Отмечены особенности влияния легирования бором в сочетании с содержанием в сплавах марганца и никеля. Методы исследований состояли в проведении и оценке результатов сравнительных лабораторных и эксплуатационно-полевых ресурсных испытаний образцов и полнокомплектных изделий с нанесенными различными видами твердосплавных покрытий. (*Результаты и обсуждение*) Исследованы четыре новых вида борсодержащих твердых сплавов. Проведены их сравнительные лабораторные и эксплуатационные испытания. Лучший из разработанных твердых сплавов, с условным обозначением ПР-ФБ3Х, имеет при наплавочном нанесении до 1,6 раз более высокий коэффициент относительной износостойкости в сравнении с лучшим из серийных сплавов ПГ-ФБХ-6-2. Разработанные сплавы в ряде случаев могут быть экономически эффективными заменителями композиций серийных твердых сплавов с добавками дорогостоящего литого карбида вольфрама. (*Выводы*) В результате проведенных исследований и практических работ созданы новые сплавы ПР-ФБ3Х и ПР-ФБ2,5Х, отличающиеся, прежде всего повышенным (до 3,2 процента) содержанием бора, имеющие высокую противоизносную характеристику. Данные сплавы возможно использовать как качественные, экономически эффективные заменители серийных железоуглеродистых сплавов с добавками литого карбида вольфрама (WC).

Ключевые слова: упрочнение, износостойкость, износ, испытания, твердые сплавы, легирующие элементы, бор.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Миронов Д.А. Противоизносные характеристики железоуглеродистых твердосплавных покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N2. С. 53-63. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-53-63. EDN: CQSIWN.

Scientific article

Anti-wear Properties of Iron-Carbon Hard Alloy Coatings for Working Bodies of Tillage Machinery

Yakov P. Lobachevsky¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences,
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Denis A. Mironov²,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: mironov-denis87@mail.ru

¹Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The development of new wear-resistant hard-alloy compositions for hardfacing the working surfaces of components operating in highly abrasive environments, particularly soil, is one of the most effective strategies for mitigating abrasive wear and its effects. Industrially produced iron–carbon-based hard alloys have relatively low abrasive wear resistance. (*Research purpose*) To develop new hard alloys based on high-alloy cast irons that increase wear resistance and improve the efficiency of hardfacing coatings applied to wear-prone components of tillage machinery. (*Materials and methods*) A priori analysis indicates that increasing boron content generally enhances the abrasion resistance of steels and hard alloys. However, the specific effects of boron alloying, particularly in iron–carbon-based hard alloys, remain complex and insufficiently studied. Based on previous research, the recommended boron content in such alloys ranges from 0.5 to 6.0 percent. This study also explores the combined effect of boron alloying with manganese and nickel. The research methodology included comparative laboratory and operational field life testing of specimens and full-scale components coated with various types of hard-alloy overlays. (*Results and discussion*) Four newly developed boron-containing hard alloys were evaluated through comparative laboratory and field tests. Among them, the alloy designated PR-FB3Kh showed the highest performance, demonstrating up to 1.6 times higher relative wear resistance when applied by hardfacing, compared to the leading industrially produced alloy PG-FBK6-2. In certain applications, these new alloys may serve as cost-effective alternatives to industrially produced hard-alloy compositions containing expensive cast tungsten carbide additives. (*Conclusions*) As a result of the research and testing, two new alloys PR-FB3Kh and PR-FB2.5Kh were developed. These alloys are distinguished primarily by their elevated boron content (up to 3.2 percent) and high wear resistance. They present a high-quality, cost-effective alternative to conventional iron-carbon-based alloys that incorporate cast tungsten carbide (WC).

Keywords: reinforcement, wear resistance, abrasion, testing, hard alloys, alloying elements, boron.

■ **For citation:** Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A. Anti-wear properties of iron-carbon hard alloy coatings for working bodies of tillage machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 53-63 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-53-63. EDN: CQSIWN.

Обеспечение высокой износостойкости компонентов машин – обязательное условие надежной и продолжительной работы машинных систем и достижения максимальной экономической выгоды от их использования, так как именно из-за износа теряется функциональность большинства (до 80%) подвижных элементов и рабочих органов машин и агрегатов [1, 2].

Самым распространенным и агрессивным видом изнашивания является абразивное. Наиболее ярко негативные последствия абразивного изнашивания проявляются при эксплуатации технических средств в почвенной среде. Проблема повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин является острой во всем мире, в существенной степени определяющей уровень технической оснащенности обеспечения технологических операций при культивировании тех или иных сельскохозяйственных культур [3]. В нашей стране это направление исследований и разработок имеет повышенную актуальность в виду многообразия типов (в том числе по изнашивающей способности) обрабатываемых почв.

Применение твердосплавных покрытий – один из эффективных путей повышения износостойкости и ресурса быстроизнашиваемых почворежущих деталей. Разработанные в 1960-1970-х годах сплавы на основе высоколегированных чугунов («сормайт», ПГ-С27, ПГ-УС25, ПГ-ФБХ-6-2 и др.), покрытия из которых наносятся на быстроизнашиваемые почворежущие рабочие органы, не отличаются вы-

сокой износостойкостью. Коэффициент относительной износостойкости этих сплавов в сравнении с термообработанными отечественными сталями 45, Л53, 65Г, М76, 30ХГСА и другими, обычно используемыми в качестве материала основы в отечественном серийном производстве деталей для почвообрабатывающих машин, находится в пределах 2,7-3,3. Такие параметры износостойкости не позволяют значительно (как правило, не более чем в 1,4-1,9 раза) повысить ресурс изнашиваемых почвообрабатывающих рабочих органов, вследствие чего использование устаревших упрочняющих сплавов в наплавочных технологиях имеет ограниченную экономическую эффективность [4, 5].

Цель исследования. Разработка новых твердых сплавов на основе высоколегированных чугунов, обеспечивающих повышение износостойкости и эффективности применения упрочняющих покрытий на быстроизнашиваемых деталях почвообрабатывающей техники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Анализ литературных источников и результатов теоретических и эксплуатационно-ресурсных исследований почворежущих рабочих органов с различными нанесенными покрытиями показал, что одним из эффективных путей увеличения износостойкости является повышение содержания в сплавах бора [6].

Бор – достаточно популярный и эффективный легирующий элемент, влияние которого на свойства сплавов изучено пока недостаточно. Отмечается сложность влияния бора на структуру и харак-

теристики наплавленного слоя. В исследовательских работах встречаются рекомендации о количестве бора в наплавленных твердосплавных материалах в пределах от 0,5 до 6%. Также известно, что лучшие характеристики при увеличении содержания бора имеют сплавы с достаточно высоким содержанием углерода (более 2-3%). В этом случае в структуре сплава появляется избыточное количество высокоизносостойких мартенситных игл. В общем плане установлено, что введение бора в твердосплавные материалы повышает их твердость и износостойкость [7, 8].

Практический опыт эксплуатации упрочненных твердыми сплавами на основе высоколегированных чугунов почвообрабатывающих деталей также показал некоторые значимые особенности, характерные для сплавов в зависимости от уровня легирования никелем и марганцем. Например, можно отметить, что практически все отечественные серийные высокоуглеродистые твердые сплавы на основе высоколегированных чугунов (ПГ-С1, ПГС-27, ПГ-УС25, ПР-Х30СРНДЮ и др.), в достаточно высокой степени применяемых при упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин, имеют в своем составе 1,2-4,2% никеля в качестве легирующей добавки. Как исключение, можно определить сплав ПГ (либо ПР)-ФБХ-6-2. Этот сплав не содержит никель (или почти не содержит), но имеет место повышенное (более 3%) содержание марганца. На основе результатов износно-ресурсных испытаний и исследований, проведенных за последние 30-35 лет, можно утверждать, что именно этот сплав устойчиво обеспечивает повышенные характеристики износостойкости наплавленных деталей [9, 10].

В сравнении с другими сплавами, содержащими никель, относительная износостойкость сплава

ПГ-ФБХ-6-2 усредненно в различных почвенных условиях выше на 12-28%. Упрочнение почвообрабатывающих деталей твердыми сплавами на никелевой основе (самофлюсующимися, содержащими более 70% никеля), даже несмотря на высокое содержание бора (до 4,3%), менее эффективно по износостойкости (на 8-17%), особенно в условиях эксплуатации в жесткоабразивной почвенной среде даже в сравнении с обычными (типа «сормайт») железоуглеродистыми сплавами, а в сравнении со сплавом ПГ-ФБХ-6-2 это различие может достигать 20-32%. При этом следует отметить, что в самофлюсующихся сплавах относительно низкое содержание основного карбидообразующего элемента углерода (не более 1,3%). Как показано ранее, ряд исследователей установили большую эффективность добавок бора при значительном содержании в сплавах углерода [11].

Таким образом, на основании аналитических, теоретических и эксплуатационных исследований можно определить, что для обеспечения повышенных характеристик износостойкости в условиях повышенного жесткоабразивного изнашивания необходимо создание новых твердых сплавов с увеличенным содержанием бора, при относительно высоких концентрациях углерода и марганца, в некоторых вариантах – без содержания никеля [12, 13]. Подобное соотношение легирующих элементов, вероятно, повысит прочность матрицы и твердость карбидных составляющих с уменьшением размеров зерна.

Методы исследований заключались в проведении и оценке результатов сравнительных лабораторных и эксплуатационно-полевых ресурсных испытаний образцов деталей и полнокомплектных рабочих органов с нанесенными различными типами твердосплавными покрытиями.

Таблица 1

Table 1

**Исходный химический состав исследуемых наносимых твердосплавных порошков
и монометаллических стальных образцов и изделий**

INITIAL CHEMICAL COMPOSITION OF THE DEPOSITED CARBIDE POWDERS AND MONOMETALLIC STEEL SAMPLES AND PRODUCTS UNDER INVESTIGATION

№ п/п	Твердый сплав или сталь	Химический состав, %											
		Основа	C	Cr	Si	Mn	Ni	Cu	B	Al	S	P	WC
1	ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)	Fe	4,5	34,6	2,0	3,2	–	–	2,1	0,4	0,03	0,03	–
2	ПР-Х30СР30РДЮ	Fe	4,92	30,7	3,15	0,93	1,42	–	2,01	0,5	0,03	0,03	–
3	ПГ-ФБ2,5Х	Fe	4,65	33,7	1,78	4,53	–	–	2,55	2,0	0,11	0,03	–
4	ПГ-ФБ3Х	Fe	4,49	32,0	2,4	3,5	–	–	3,2	–	0,011	0,03	–
5	ПР-Х30СР2,5НДЮ	Fe	4,28	31,0	3,9	1,1	1,68	0,7	2,75	2,0	0,001	0,03	–
6	ПР-Х30СР3НДЮ	Fe	4,45	30,4	3,9	1,08	1,56	0,7	3,2	2,0	0,001	0,03	–
7	ПГ-ФБ3Х(70%)+WC(30)	Fe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	30
8	ПР-Х30СР3НДЮ (70%) + WC(30%)	Fe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	30
9	ПГ-ФБХ-6-2(70%)+ WC(30%)	Fe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	30
10	Сталь 45	Fe	0,46	0,20	0,27	0,70	0,15	0,10	–	0,05	0,040	0,035	–
11	Сталь 30ХГСА	Fe	0,31	1,0	1,1	0,45	0,2	0,2	–	0,03	0,025	0,025	–

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В соответствии с приведенными научно-практическими обоснованиями создания новых твердых сплавов были исследованы четыре новых твердых сплава с увеличенным содержанием бора: два – на основе серийного безникелевого твердого сплава ПР-ФБХ-6-2 и два – на основе сплава с содержанием никеля (до 2%) ПР-Х30СРНДЮ также с увеличенным содержанием бора. Кроме того, в развитие и для уточнения приведенных в работе научных данных было исследовано три сплава (серийный и два опытных) с механической добавкой 30% порошка литого карбида вольфрама (WC) [14, 15].

В качестве материала-эталоны использовались серийные отечественные стали 45 и 30ХГСА, часто являющиеся материалом основы отечественных и импортных рабочих органов почвообрабатывающих машин. Химический состав исследуемых наносимых твердосплавных порошков и моносталей [8] представлен в *таблице 1*.

Все сплавы (серийные и опытные) выплавлены методом распыла в АО «Полема» (г. Тула). Грануляция твердосплавных порошков 140-630 мкм. Изготовление механических смесей сплавов с карбидом вольфрама (WC) произведено на специальном оборудовании в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Исследования структуры и другие металлографические исследования проводились в НИТУ МИСиС. Нанесение твердосплавных покрытий на образцы и опытные почворезущие рабочие органы выполнялись методом плазменной дуговой наплавки [16, 17] в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

На первом этапе были проведены лабораторные сравнительные испытания на износостойкость на двух различных лабораторных стендах (*рис. 1*) [18].

Обобщенные сравнительные результаты лабораторных исследований приведены в *таблицах 2, 3*.



Рис. 1. Исследование процесса изнашивания образца: сверху на стенде ИМ-01; внизу на круговом стенде
Fig. 1. Examination of the sample wear process at the IM-01 test stand (top) and at the circular test stand (bottom)

Условия лабораторных исследований: абразив – песок крупный (67%) + глина (33%); скорость движения образцов – 2 м/с; глубина хода образцов – 14-15 см; цикл исследований – 100 ч; размеры образцов: 6×30×60 мм; толщина твердосплавного покрытия – 3 мм; повторность – трехкратная.

При анализе результатов сравнительных лабораторных исследований на абразивную износостойкость учитывалось следующее.

При работе на машине трения ИМ-01 изнашиванию подвергается только наружная поверхность твердого сплава (твердосплавного покрытия), а при исследованиях на круговом почвенном стенде – преимущественно торцевая поверхность твердосплавного покрытия. Этот факт является одной из вероятных причин относительно невысокой срав-

Таблица 2

Table 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТЕНДЕ ИМ-01 ПОКРЫТИЙ ИЗ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТАЛЕЙ ПРИ УДЕЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ НА РОЛИК 200 Г И 500 Г				
RESULTS OF LABORATORY TESTS AT THE IM-01 STAND FOR CARBIDE AND STEEL COATINGS UNDER SPECIFIC LOADS OF 200 G AND 500 G PER ROLLER				
№ п/п	Марка материала (сталь, твердый сплав)	Твердость, ед. HRC	Коэффициент относительной износостойкости ($K_{но}$)	
			при нагрузке 200 г	при нагрузке 500 г
1	ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)	58-59	3,47	3,09
2	ПР-Х30СРНДЮ (серийный)	56-58	2,95	2,58
3	ПГ-ФБ2,5Х	61-63	3,84	3,68
4	ПГ-ФБ3Х	65-69	4,29	4,11
5	ПР-Х30СР2,5НДЮ	61-63	3,53	3,44
6	ПР-Х30СР3НДЮ	60-62	3,59	3,41
7	ПГ-ФБ3Х(70%)+WC(30%)	63-67	4,88	4,76
8	ПР-Х30СР3НДЮ(70%)+WC(30%)	62-67	3,88	4,08
9	ПГ-ФБХ-6-2(70%)+WC(30%)	61-64	3,94	3,82
10	Сталь 45	38-41	1,00	1,00
11	Сталь 30ХГСА	46-50	1,08	1,06

Таблица 3

Table 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ С ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ (ОПЫТНЫМИ И СЕРИЙНЫМИ) ПОКРЫТИЯМИ И ОБРАЗЦОВ ИЗ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ НА КРУГОВОМ ПОЧВЕННОМ СТЕНДЕ
RESULTS OF LABORATORY TESTS ON SAMPLES WITH CARBIDE COATINGS (EXPERIMENTAL AND SERIAL) AND MONOMETALLIC STEEL SAMPLES AT THE CIRCULAR SOIL TEST STAND

№ п/п	Марка материала (сталь, твердосплавное покрытие)	Твердость, ед. HRC	Среднее значение линейного износа образца, мм		Коэффициент относительной износостойкости	
			с твердосплавным покрытием или монометаллической сталью	без покрытия (эталоны)	образца, $K_{лин}$	покрытия (твердого сплава) расчетный, $K_{по}$ ()
1	ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)	58-62	4,5	11,0	2,44	3,45
2	ПР-Х30СРНДЮ (серийный)	56-58	5,4	11,0	2,03	2,87
3	ПГ-ФБ2,5Х	61-63	3,8	10,9	2,87	4,06
4	ПГ-ФБ3Х	64-69	3,5	11,1	3,17	4,48
5	ПР-30СР2,5НДЮ	61-63	4,1	11,2	2,73	3,86
6	ПР-Х30СРЗНДЮ	60-62	4,0	11,0	2,75	3,89
7	ПГ-ФБ3Х(70%) +WC(30%)	63-67	3,0	11,2	3,73	5,28
8	ПР-Х30СРЗНДЮ (70%)+WC(30%)	62-67	3,2	10,8	3,48	4,92
9	ПГ-ФБХ-6-2(70%)+WC(30%)	61-64	3,3	10,9	3,33	4,67
10	Сталь 45	38-41	-	11,5	1,0	-
11	Сталь 30ХГСА	45-50	10,6	11,3	1,07	-

Условия лабораторных исследований: абразив – песок крупный (67%) + глина (33%); скорость движения образцов – 2 м/с; глубина хода образцов – 14-15 см; цикл исследований – 100 ч; размеры образцов: 6×30×60 мм; толщина твердосплавного покрытия – 3 мм; повторность – трехкратная.

нительной износостойкости сплавов с добавками WC при испытаниях на машине ИМ-01 ввиду того, что зерна WC более тяжелые и опускаются при наплавке вниз, а изнашиванию подвергается верхний наружный слой.

Критерием износа на машине ИМ-01 является сравнительные весовые параметры (весовой износ), а на круговом почвенном стенде – линейные параметры (линейный износ). Абразивной массой на машине ИМ-01 служит сверхтвердый электрокорунд, а на круговом почвенном стенде – реальная почвенная масса (смесь песка и глины).

Конструкция машины трения ИМ-01 позволяет исследовать образцы при различном нагружении и, соответственно, различных удельных контактных нагрузках. Например, при нагрузке на образец 4 Н контактное давление на изнашиваемую зону образца составляет примерно 0,1 МПа.

На круговом почвенном стенде удельные нагрузки относительно постоянны и усреднено находятся в пределах 0,060-0,08 МПа. Следует отметить, что в реальных почвенных условиях удельные нагрузки могут меняться в очень широких пределах (в зависимости от состава почвы, ее предшествующей обработки, влажности, погодных условий и т.п.) – от 0,03 до 0,85 МПа [9].

Необходимо учитывать, что сравнительные показатели износостойкости очень сильно зависят от состава абразива, действующих удельных нагрузок, механизма изнашивания (микрорезание, жесткое или усталостное выкрашивание и др.) и многих

других условий. На разных стендах образцы имитируют несколько отличные условия изнашивания твердосплавных материалов. Поэтому оценка сравнительных результатов изнашивания на машине трения ИМ-01 примерно соответствует точности 80-82%, а на круговом почвенном стенде, соответственно – 90-95%.

Следовательно, с точки зрения эксплуатационной износостойкости испытания на круговом почвенном стенде являются более точными, хотя и более трудоемкими.

Однако, такой важнейший показатель, характеризующий свойства материалов, как коэффициент их относительной износостойкости $K_{но}$, на круговом почвенном стенде может быть определен напрямую только при сравнении монометаллических фрагментов изделий, по их линейному износу. Для биметаллических двухслойных наплавленных фрагментов этот показатель напрямую определить невозможно.

На стенде ИМ-01 коэффициент относительной износостойкости $K_{но}$ определяется по сравнительным данным весовых износов практически для любых материалов. Тем не менее, точность определения этого параметра не очень высока. В некоторых случаях коэффициент вариации может достигать 25-35%, особенно при тестировании твердосплавных покрытий.

По этой причине для кругового почвенного стенда была разработана приближенная оценка коэффициента относительной износостойкости $K_{но}$

испытываемых материалов для двухслойных биметаллических, упрочненных, наплавленных фрагментов почворезущих лезвий, т.е. коэффициента относительной износостойкости твердосплавного покрытия относительно материала основы.

Вначале определяется коэффициент повышения линейной износостойкости двухслойного фрагмента в сравнении с однослойным (монометаллическим), изготовленным из того же материала основы, что и у биметаллического наплавленного образца.

Определение коэффициента повышения линейной износостойкости $K_{ли}$ материала твердосплавного покрытия осуществляется по формуле:

$$K_{ли} = \frac{U_{л\text{сер}}}{U_{л\text{оп}}},$$

где $U_{л\text{оп}}$ – линейный износ опытного двухслойного наплавленного фрагмента; $U_{л\text{сер}}$ – линейный износ монометаллического (серийного) фрагмента.

Определение коэффициента относительной износостойкости покрытия (твердосплавного слоя) приближенным методом осуществляется по формуле:

$$K_{ио}^{\text{пок}} \approx \frac{\sqrt{h_{ос}}}{\sqrt{h_{пок}}} \cdot K_{ли},$$

где $K_{ио}^{\text{пок}}$ – относительная износостойкость материала покрытия; $h_{ос}$ – толщина основы материала детали, мм; $h_{пок}$ – толщина покрытия (твердого сплава), мм; $K_{ли}$ – коэффициент линейной износостойкости.

При необходимости полученное значение $K_{ио}^{\text{пок}}$ пересчитывается (корректируется) к коэффициенту относительной износостойкости стали 45 (термообработанной на 40 HRC), равному единице. То есть, полученное значение $K_{ио}^{\text{пок}}$ умножается на отношение линейных износов $U_{л\text{осн}}/U_{л\text{эт}}$ эталонного, из стали 45 и изготовленного из исследуемого материала основы монометаллических испытываемых фрагментов.

Данная приближенная методика основывается на известном факте пропорциональности линейного износа толщине упрочняющего слоя, взятой в степени 0,5-0,6 [7].

Результаты исследований определения износостойкости (коэффициента относительной износостойкости) одних и тех же материалов на двух стендах сравнивались между собой. При большой разнице (более 15-20%) проводятся уточняющие (дополнительные) опыты (испытания). После получения сопоставимых результатов можно считать, что коэффициент относительной износостойкости исследуемого материала определен с приемлемой (до 5-7% различий) точностью. При многократном получении несопоставимых (различных) результатов при лабораторных исследованиях по двум методикам выбирается результат, полученный на кру-

гом почвенном стенде, как более точный.

При этом результаты сравнительных лабораторных исследований на износостойкость оценивались как предварительные, необходимые для выбора лучших вариантов. Данные результаты должны уточняться и проверяться при проведении эксплуатационно-полевых ресурсных исследований.

Анализ результатов лабораторных исследований образцов с твердосплавными покрытиями на абразивную износостойкость (см. табл. 2 и 3) показал следующее. В целом новые разработанные твердые сплавы (с условными обозначениями ПГ-ФБ2,5Х, ПГ-ФБ3Х, ПР-Х30СР2,5НДЮ, ПР-Х30СР3НДЮ), отличающиеся в основном увеличенным легированием бора, имеют коэффициент относительной износостойкости в сравнении с лучшим относительно широко применяемым сплавом ПГ-ФБХ-6-2 усредненно (с учетом выпадающих точек) выше на 12-34%.

Наибольшие значения коэффициента относительной износостойкости $K_{ио}$ установлены у сплава ПГ-ФБ3Х. Новые сплавы, в том числе легированные 1,5-1,7% никеля (ПР-Х30СР2,5НДЮ и ПР-Х30СР3НДЮ), несколько уступают по износостойкости новым сплавам с повышенным содержанием бора и значительным количеством марганца (ПГ-ФБ2,5Х и ПГ-ФБ3Х), особенно последнему.

Результаты лабораторных исследований подтвердили, что добавка в сплавы на железной основе литого карбида вольфрама (WC) повышает коэффициент их относительной износостойкости при эксплуатации в жесткоабразивной среде. Однако в сравнении с серийными сплавами, имеющими в своем составе относительно небольшое количество бора, для разработанных новых сплавов это повышение существенно ниже (15-26%), в то время как у серийных сплавов добавка WC повышает коэффициент их относительной износостойкости $K_{ио}$ на 37-57% [14].

С одной стороны, этот факт означает то, что для новых сплавов с увеличенным содержанием бора (в среднем 2,55-3,2%) добавка WC менее эффективна (на грани положительной рентабельности при использовании в качестве упрочняющего слоя почворезущих деталей), с другой – что новые сплавы могут быть достаточно эффективным заменителем значительно более дорогих сплавов с содержанием карбида вольфрама.

Для проверки результатов лабораторных исследований на относительную износостойкость были проведены достаточно обширные эксплуатационно-ресурсные износные сравнительные испытания натурных наплавленных сплавов почворезущих рабочих органов. Испытания по оценке сравнительной износостойкости различных вариантов твердых сплавов проводились по четырем типам упроч-

ненных и монометаллических почворезущих рабочих органов. Наиболее полный объем испытаний проводился специализированным испытательным подразделением Владимирской государственной машиноиспытательной станции (г. Покров) по наиболее нагруженной детали – долоту лемеха отечественного плуга ЛМД-00У (рис. 2).



Рис. 2. Вид упрочненного наплавочным твердым сплавом испытуемого долота лемеха плуга ЛМВ-00У

Fig. 2. View of the tested LMV-00 U plowshare chisel reinforced with hard-alloy surfacing

Испытания проходили в Суздальском районе Владимирской области при следующих условиях: тип почвы – средний суглинок; глубина обработки – 21,8-23,5 см; предшествующая обработка почвы – дискование после уборки зерновых колосовых культур; твердость почвы на глубине обработки – 2,2-3,6 МПа. Испытывались девять вариантов упрочненных долот (табл. 4). Материал основы упрочненных наплавленных долот – Ст 30ХГСА, термообработанная до 46-51 ед. HRC ($K_{\text{лин}} = 1,07$); толщина наплавленного слоя – 3,4-3,6 мм; толщина материала основы – 12 мм.

Наряду с этим были проведены эксплуатационно-ресурсные полевые сравнительные испытания еще трех типов упрочненных исследуемыми твердосплавными покрытиями почворезущих деталей: импортозамещающих лемеха и долота плуга фирмы «Лемкен» (ФРГ) и импортозамещающих ножей фрезы грядообразователей фирмы «Джон Инжиниринг» (Англия). Эти рабочие органы были упрочнены двумя видами разработанных твердых сплавов, имеющих лучшие характеристики износостойкости по результатам лабораторных исследований – ПР-ФБЗХ; ПР-ФБЗХ(70%)+WC(30%).

Результаты испытаний лемехов и долота плугов фирмы «Лемкен» (рис. 3) приведены в таблице 5.

Результаты экспериментально-ресурсных испытаний упрочненного долота плуга «Лемкен» (рис. 3с) приведены в таблице 6.

Испытания проходили в ЗАО «Раменье» (Дмитровский район, Московская обл.). Условия испытаний: почвы – легкий и средний суглинок; глубина обработки – 23-26 см; твердость почвы на глубине обработки – 2,6-3,9 МПа.

Сравнительные испытания импортозамещающих и серийных ножей фрезы грядообразователей фирмы «Джон Инжиниринг» (рис. 4) проходили в



Рис. 3. Вид изношенного (после наработки 35 га): а – серийного импортного изготовленного из высокопрочной титансодержащей стали лемеха плуга фирмы «Лемкен» (ФРГ); b – импортозамещающего лемеха плуга фирмы «Лемкен», наплавленного опытным твердым сплавом ПР-ФБЗХ; c – импортозамещающего долота плуга фирмы «Лемкен», наплавленного опытным твердым сплавом ПР-ФБЗХ

Fig. 3. View of a worn-out components (after operating 35 ha): a – serial imported plowshare made of high-strength titanium-containing steel (Lemken, Germany); b – import-substituting plowshare for Lemken plow, surfaced with experimental hard alloy PR-FBZH; c – import-substituting chisel for Lemken plows, surfaced with experimental hard alloy PR-FBZH



Рис. 4. Вид импортозамещающих ножей грядообразователя, наплавленных сплавом ПР-ФБЗХ, после наработки 60 га на машину (0,4 га на один нож)

Fig. 4. View of import-substituting ridge-forming knives, surfaced with PR-FB3Kh alloy, after operating 60 hectares of operation per machine (or 0.4 ha per knife)

ЗАО «Совхоз имени Ленина» (Ленинский район, Московская обл.). Условия испытаний: почвы – средний суглинок; глубина обработки – 12-15 см; твердость почвы на глубине обработки – 1,4-2,5 МПа.

Результаты сравнительных эксплуатационно-ресурсных испытаний ножей грядообразователя фирмы «Джон Инжиниринг» приведены в таблице 7.

Таблица 4

Table 4

**ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДОЛОТА ЛМД-00У
С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ УПРОЧНЕНИЯ
CONSOLIDATED RESULTS OF COMPARATIVE PERFORMANCE AND DURABILITY TESTS OF THE LMD-00U
PLOWSHARE CHISELS REINFORCED BY DIFFERENT METHODS**

№ п/п	Марка материала, в том числе упрочненного твердосплав- ным покрытием	Твердость упрочненного слоя, ед. HRC	Линейный износ долота после наработки 68 га, мм	Коэффициент линейной износостойкости		
				относительно стали 45 (Л53)	относительно долота, упрочненного серийным сплавом ПР-ФБХ-6-2	сплава (расчетный метод)
1	Сталь Л53 (аналог стали 45)	37-41	44	–	–	1,0
2	Сплав ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)	58-62	24	1,83	–	3,18
3	Сплав ПГ-ФБ2,5Х	60-63	17	2,59	1,41	4,48
4	Сплав ПГ-ФБ3Х	62-67	15	2,93	1,60	5,07
5	Сплав ПР-Х30СР2,5НДЮ	60-62	23	1,91	1,04	3,31
6	Сплав ПР-Х30СР3НДЮ	59-62	19	2,32	1,26	4,00
7	Сплав ПГ-ФБ3Х(70%) + WC(30%)	61-65	13	3,38	1,85	5,85
8	Сплав ПР-Х30 СР3НДЮ (70%) + WC(30%)	59-64	16	2,75	1,50	4,76
9	Сплав ПГ-ФБХ-6-2 (серийный) (70%) + WC(30%)	60-63	17	2,59	1,41	4,48
9	Сплав ПГ-ФБХ-6-2 (серийный) (70%) + WC(30%)	60-63	17	2,59	1,41	4,48

Таблица 5

Table 5

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ И ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ УПРОЧНЕННЫХ ЛЕМЕХОВ ПЛУГОВ «ЛЕМКЕН» (ФРГ)
COMPARATIVE RESULTS OF FIELD TESTS OF SERIAL AND IMPORT-SUBSTITUTING REINFORCED PLOWSHARES FOR LEMKEN PLOWS (GERMANY)**

Показатель	Марка материала, в том числе упрочненного твердосплавным покрытием*		
	Импортная сталь	Сплав ПГ-ФБ3Х	Сплав ПГ-ФБ3Х(70%) + WC(30%)
Твердость упрочненного слоя, ед. HRC	52-54	62-65	61-67
Предельное значение износа лемеха по лезвию после наработки 35 га, мм	23,0-24,0	15,0-16,0	12,0-13,0
Среднее значение износа долота после наработки 35 га, мм	23,5	15,5	12,5
Коэффициент линейной износостойкости, относительно импортной высокопрочной стали	–	1,52	1,88
Коэффициент относительной износостой- кости материала (расчетный, пересчитан- ный относительно Ст 45)	1,65 (по данным других исследований)	4,92	6,04

* Материал основы лемехов (лист 10) и долот (лист 16) – Ст 30ХГСА; термообработка до 46-51 ед. HRC ($K_{лин} = 1,07-1,08$); толщина на-
плавленного слоя у лемеха – 2,2-2,4 мм; у долота – 3,3-3,4 мм.

Анализ результатов эксплуатационно-ресурс-
ных натурных полевых испытаний (таблицы 4-7)
в сопоставлении с результатами лабораторных ис-
следований на относительную износостойкость
(таблицы 2-4) показал, что в основном (с точностью
80-88%) данные эксплуатационных испытаний со-
ответствуют аналогичным результатам лаборатор-
ных исследований.

Некоторые различия в показателях относитель-
ной износостойкости (например, для лучших спла-
вов ПР-ФБ3Х и ПР-ФБ3Х(70%)+WC(30%), составля-
ющие в пределах 4,11-5,73 и 4,76-7,81 соответственно)
объясняются как особенностями лабораторных ис-
следований, так и общеизвестным фактом измене-
ния коэффициента относительной износостойкости

при отличии величин действующих удельных нагру-
зок на изделия, в частности сближения этих коэф-
фициентов при росте нагрузок и, наоборот, некото-
ром различии при снижении значений нагрузки [6].

Таким образом, разработанные твердые сплавы
с повышенным уровнем легирования бором имеют
преимущество по износостойкости перед серийны-
ми сплавами, в частности ПГ-ФБХ-6-2, усреднено в
пределах 12-60%. Наибольшую износостойкость
проявил сплав ПР-ФБ3Х. Значительное повышения
характеристик износостойкости этого сплава (а так-
же ПР-ФБ2,5Х) объясняется увеличенным содержа-
нием бора совместно со значительным содержа-
нием марганца (без содержания никеля), что очевидно
повышает прочность матрицы и твердость карбид-

Таблица 6

Table 6

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ И ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ НАПЛАВЛЕННЫХ ДОЛОТ ПЛУГА «ЛЕМКЕН» (ФРГ)
COMPARATIVE RESULTS OF FIELD TESTS OF SERIAL AND IMPORT-SUBSTITUTING FUSED BITS OF THE LEMKEN PLOW (GERMANY)

Показатель	Марка материала, в том числе упрочненного твердосплавным покрытием*		
	Импортная сталь	Сплав ПГ-ФБЗХ	Сплав ПГ-ФБЗХ(70%) + WC(30%)
Твердость упрочненного слоя, ед. HRC	52-54	62-65	62-67
Предельное значение износа долота по лезвию после наработки 35 га, мм	48,5-49,5	36,5- 37,7	30,5-31,5
Среднее значение износа долота после наработки 35 га, мм	49	37	31
Коэффициент линейной износостойкости, относительно импортной высокопрочной стали	—	1,33	1,58
Коэффициент относительной износостойкости материала (расчетный, пересчитанный относительно Ст 45)	1,60 (по данным других исследований)	4,38	5,21

*Материал основы лемехов (лист 10) и долот (лист 16) – Ст 30ХГСА; термообработка до 46-51 ед. HRC ($K_{лин} = 1,07-1,08$); толщина наплавленного слоя у лемеха – 2,2-2,4 мм; у долота – 3,3-3,4 мм.

Таблица 7

Table 7

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НОЖА ФРЕЗЫ КАРТОФЕЛЬНОГО И ОВОЩНОГО ГРЯДОБРАЗОВАТЕЛЯ ФИРМЫ «ДЖОН ИНЖИНИРИНГ» (АНГЛИЯ)
COMPARATIVE TEST RESULTS OF THE CUTTER KNIVES OF THE POTATO AND VEGETABLE GROWER OF THE JOHN ENGINEERING (ENGLAND)

Показатель	Марка материала, в том числе упрочненного твердосплавным покрытием*		
	Импортная сталь	Сплав ПГ-ФБЗХ	Сплав ПГ-ФБЗХ(70%) + WC(30%)
Предельные значения износов ножа по лезвию после наработки 0,4 га на нож, мм	0,75-0,85	0,40-0,50	0,28-0,38
Среднее значение износа ножа после наработки 0,4 га на нож, мм	0,80	0,45	0,33
Коэффициент линейной износостойкости, относительно импортной высокопрочной стали	—	1,78	2,43
Коэффициент относительной износостойкости материала (расчетный, пересчитанный относительно Ст 45)	1,53-1,58 (по данным других исследований)	5,73	7,81

*Материал основы опытных ножей (лист 12) – Ст 30ХГСА; термообработка до 46-51 ед. HRC ($K_{лин} = 1,07-1,08$); толщина наплавочного слоя – 2,3-2,5 мм; материал серийных ненаплавленных ножей – импортная высокопрочная сталь твердостью 51-53 ед. HRC.

ных составляющих с уменьшением размеров зерна.

Опытные никельсодержащие железоуглеродные сплавы ПР-ХЗОСР2,5НДЮ и ПР-ХЗОСР3НДЮ, хотя и несколько (до 20-27%) уступают по относительной износостойкости сплаву ПР-ФБЗХ, но превосходят по износостойкости серийные сплавы и, соответственно, также могут найти применение в производстве. Кроме того, по результатам исследований установлено, что эти сплавы имеют несколько более высокие характеристики адгезии и когезии, а также пределы сопротивления хрупкому разрушению, особенно в случае толстослойной (более 3,0 мм) наплавки. Вследствие этого они могут быть эффективны при использовании упрочненных ими рабочих органов на каменистых почвах, а также для изделий с большей толщиной наплавочного упрочненного слоя.

Разработанные сплавы, особенно ПР-ФБЗХ, могут быть эффективными заменителями серийных сплавов с добавками (до 30-35%) литого карбида вольфрама (WC), с учетом того, что цена сплава с добавками WC возрастет в 2,7-3,5 раза, а цены упрочненных твердыми сплавами деталей и добавками WC, в частности

почвообрабатывающих машин, соответственно увеличиваются для различных изделий на 26-45%.

Выводы. В результате проведенных исследований и практических работ созданы новые сплавы, отличающиеся прежде всего повышенным (до 3,2%) содержанием бора, имеющие высокую противоизносную эффективность, что подтверждается широкой производственной проверкой в хозяйственных условиях.

Лучшие характеристики износостойкости по результатам лабораторных исследований и эксплуатационных испытаний имеет безникелевый высокомарганцовистый борсодержащий (до 3,2%) твердый сплав с условным названием ПР-ФБЗХ, имеющий коэффициент относительной износостойкости $K_{ои}$ (относительно стали 45) в пределах 4,11-5,73, что примерно в 1,3-1,6 раз выше (при различных условиях) в сравнении с лучшим из серийных железоуглеродистых сплавов ПГ-ФБХ-6-2.

Разработанные сплавы ПР-ФБЗХ и ПР-ФБ2,5Х возможно использовать как качественные, экономически эффективные заменители серийных железоуглеродистых сплавов с добавками литого карбида вольфрама (WC).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов Д.А. Технологические методы повышения ресурса и работоспособности быстроизнашиваемых рабочих органов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4 (45). С. 118-123. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-118-123.
2. Ахметшин Т.Ф., Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2013. N3 (41). С. 81-84. EDN: QJCGHT.
3. 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. EDN: EPBXHL.
4. Добрин Д.А. Актуальные технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Технический сервис машин*. 2022. N4. С. 111-117. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117.
5. Соболевский И.В., Турин Е.Н., Калафатов И.И. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом почвенных условий республики Крым // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 14. N3 (70). С. 42-50. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_42.
6. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Исследование износостойкости ножей в период эксплуатации и оценка эффективных методов их упрочнения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2024. N1. С. 97-106. DOI: 10.31857/S0235711924010117.
7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сидоров С.А. и др. Использование биметаллических сталей для повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013. N2. С. 80-81. EDN: QAZOOR.
8. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N3. С. 72-78. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
9. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. *Welding International*. 2016. Vol. 30. N10. С. 808-812. DOI: 10.1080/09507116.2016.1148408.
10. Ожегов Н.М., Добринов А.В., Ружьев В.А. Исследование методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. N3. С. 28-31. EDN: YIZVJR.
11. Ерохин М.Н., Новиков В.С. Прогнозирование долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин при их разработке // *Вестник МГАУ*. 2017. N6 (82). С. 56-62. EDN: USEAKL.
12. Дудников А.А., Беловод А.И., Пасюта А.Г. и др. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. Т. 5. N1 (25). С. 4-7. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.48825.
13. Муртазин Г.Р., Зиганшин Б.Г., Яхин С.М. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Техника и оборудование для села*. 2015. N10. С. 32-34. EDN: UQFKOT.
14. Аулов В.Ф., Лялякин В.П., Михальченков А.М. и др. Повышение ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию долот лемехов наплавкой электродами с бор-содержащей обмазкой // *Сварочное производство*. 2019. N7. С. 28-31. EDN: BLYOAQ.
15. Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Сидоров С.А. и др. Разработка и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N4. С. 3-8. EDN: WLZXPД.
16. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.
17. Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Ишков А.В. и др. Экспериментальные исследования износостойкости образцов из стали 65Г и с покрытием скоростным ТВЧ-борированием // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 9. N2-2. С. 507-511. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.507-511.
18. Лискин И.В., Миронов Д.А., Курбанов Р.К. Обоснование параметров искусственной почвенной среды для лабораторного исследования изнашивания лезвия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.4.3742.

REFERENCES

1. Mironov D.A. Technological methods of increasing the resource and efficiency of fast-wearing working bodies. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021. Vol. 68. N4 (45). 118-123 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-118-123.
2. Akhmetshin T.F. Strengthening of wear and tear resistance and durability of working devices of tilling machines. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2013. N3 (41). 81-84 (In Russian). EDN: QJCGHT.
3. Sidorov S.A., Zvolinsky V.N. Improving the strength characteristics of the working tillage machinery organs by protecting certain areas from intense abrasive wears. *Machinery Technical Service*. 2019. N1 (134). 179-193 (In Russian). EDN: EPBXHL.

4. Dobrin D.A. Relevant hardening technologies for tillage machines work tools. *Machinery Technical Service*. 2022. N4. 111-117 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117.
5. Sobolevskiy I.V., Turin E.N., Kalafatov I.I. Resource increasing of the working bodies of tillage machinery with consideration to the soil conditions of the Republic of Crimea. *Vestnik of the Voronezh State Agrarian University*. 2021. Vol. 14. N3 (70). 42-50 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_42.
6. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Investigation of wear resistance of knives during operation and evaluation of effective methods of their hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
7. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Sidorov S.A. et al. Using bimetallic steels for increasing the resource of working organs in agricultural machinery. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
8. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agroengineering*. 2023. Vol. 25. N3. 72-78 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
9. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. *Welding International*. 2016. Vol. 30. N10. 808-812 (In English). DOI: 10.1080/09507116.2016.1148408.
10. Ozhegov N.M., Dobrinov A.V., Ruzhev V.A. Investigations of methods of strengthening the working organs of tillage machines and the development of an automatic plant for applying hardening coatings on them. *Modern High-tech Technologies*. 2017. N3. 28-31 (In Russian). EDN: YIZVJR.
11. Erokhin M.N., Novikov V.S. Forecasting durability of working elements of designed soil-cultivating machines. *Bulletin of MGAU*. 2017. N6 (82). 56-62 (In Russian). EDN: USEAKL.
12. Dudnikov A.I., Belovod A., Pasuta A. et al. Technological methods of increasing the durability and resource of working parts of tillage machines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. Vol. 5. N1 (25). 4-7 (In Russian). DOI: 10.15587/2312-8372.2015.48825.
13. Murtazin G.R., Ziganshin B.G., Jakhin S.M. Resource increase of operative parts of tillage machines. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2015. N10. 32-34 (In Russian). EDN: UQFKOT.
14. Aulov V.F., Lyalyakin V.P., Mikhachchenkov A.M. et al. Increase of the resource and resistance to abrasive wear of plow chisels by deposition with boron-containing coating electrodes. *Welding Production*. 2019. N7. 28-31 (In Russian). EDN: BLYOAQ.
15. Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Sidorov S.A. et al. Working out and production technique of soil cultivating working tools. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N4. 3-8 (In Russian). EDN: WLZXP.
16. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Soil-Cultivating machinery: ways of import substitution. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N2. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-37-41.
17. Aulov V.F., Rozhkov Yu.N., Ishkov A.V. et al. Experimental study of wear resistance of samples from steel 65g and samples coated with high-speed high-frequency current boriding. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Vol. 9. N2-2. 507-511 (In Russian). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.507-511.
18. Liskin I.V.I., Mironov D.A.I., Kurbanov R.K. Justification of parameters artificial soil for laboratory research of cutting edge wear. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N4. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.4.3742.

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.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Lobachevsky Ya. P. – scientific supervision, defining the main research perspectives;

Mironov D.A. – gathering and analyzing research and practical materials, formulating general conclusions.

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

02.04.2025

12.05.2025