

DOI

УДК 631.317:631.311

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ
ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ****Д. А. Миронов, А. К. Ламм, Р. К. Расулов**

Реферат. Функционирования сельскохозяйственных машин и оборудования является неотъемлемым фактором в обеспечении устойчивости производства. Изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих механизмов связано с постепенным изменением их геометрических и физико-механических характеристик, что в свою очередь снижает эффективность обработки почвы. Один из методов решения данной задачи является нанесение защитного слоя материала, обладающего повышенной стойкостью к изнашиванию. Метод селективного лазерного спекания (SLS) и плазменно-порошковой наплавки представляют собой технологии для нанесения защитных слоев на поверхность деталей сельскохозяйственных машин. Сравнительный анализ этих методов позволяет оценить их эффективность и применимость в условиях сельского хозяйства. Результаты сравнения этих методов позволяют выбрать оптимальное решение в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации сельскохозяйственного оборудования. Расчет выбора конструктивно-материаловедческих параметров показывает, что при использовании селективного лазерного спекания как метода упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин экономия твердого сплава составит 35%. Установлено, что за счет формирования однородного, тонкого, износостойкого, упрочняющего слоя на рабочем органе происходит эффективное формообразование его лезвийной части, которая обеспечивает установленную глубины пахоты, не нарушая агротехнических показателей процесса обработки почвы. При испытании на надежность определили, что интенсивность износа опытных долот значительно ниже серийных. Средняя скорость износа у 8 долот составляет: опытных образцов – 0,458 мм/га, серийных образцов – 0,559 мм/га. Эффективность использования новых материалов и метода (SLS) для упрочнения почворежущих рабочих органов в сравнении с упрочнением плазменным методом в эксплуатационных условиях, обеспечит повышение ресурса опытных деталей на 18%.

Ключевые слова: рабочие органы, почвообрабатывающие машины, экономическая эффективность использования, плазменно-порошковая наплавка, 3D печать, метод селективного лазерного спекания.

Введение. Эффективность функционирования сельскохозяйственных машин и оборудования является неотъемлемым фактором в обеспечении устойчивости производства. Изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих механизмов, таких как плуги, бороны, культиваторы, связано с постепенным изменением их геометрических и физико-механических характеристик, что в свою очередь снижает эффективность обработки почвы [1, 2, 3]. Повышенный износ элементов сельскохозяйственных агрегатов приводит к значительным временным простоям в процессе восстановления, что подчеркивает актуальность проблемы обеспечения надежности техники [4, 5].

Один из методов решения данной задачи является нанесение защитного слоя материала, обладающего повышенной стойкостью к изнашиванию. Этот подход существенно способствует увеличению срока службы рабочих органов и повышению эффективности использования производственных ресурсов [6].

Метод селективного лазерного спекания (SLS) и плазменно-порошковой наплавки представляют собой технологии для нанесения защитных слоев на поверхность деталей сельскохозяйственных машин. Сравнительный анализ этих методов позволяет оценить их эффективность и применимость в условиях сельского хозяйства.

Метод SLS основан на использовании лазерного излучения для точечного нагрева

поверхности, на которой происходит спекание порошкового материала.

Метод селективного лазерного спекания в отличие от традиционно используемых методов (плавления) позволяет формировать (выращивать, добавлять) слои любой конфигурации с равномерным распределением твердых частиц металлопорошка, что в свою очередь определяет равномерный износ рабочего органа и эффективное формообразование его лезвийной части это увеличивает качество агротехнических параметров проводимой операции и снижает нагрузку на агрегат.

Также за счет возможности использования более твердых порошков при спекании повышается ресурс и снижается толщина наносимого слоя что в свою очередь снижает риск возникновения широкой затылочной фаски, которая так же влияет на энергетические показатели и качество обработки почвы.

Плазменно-порошковая наплавка включает в себя использование плазмы для плавления порошкового материала, который затем наносится на поверхность детали [7, 8].

Основным недостатком плазменных методов упрочнения является неравномерное распределение микротвёрдости в обрабатываемом слое [9]. Эта проблема связана с тем, что частицы карбида вольфрама, из-за их ограниченной способности растворяться в ванне жидкого металла, образуют конгломераты, которые не успевают полностью раствориться. Кроме того, для достижения расплавления

вольфрама и, следовательно, его равномерно распределения в слое, поскольку нерасплавленные частицы вольфрама концентрируются на дне ванны расплава. Для решения вышеперечисленных проблем требуется увеличить тепловой вклад. Однако это может вызвать перегрев сплава.

В тоже время технология селективного лазерного спекания не нуждается в полном расплавлении частиц.

Деталь после нанесения защитного слоя не требует термической обработки, поэтому можно упрочнять готовые рабочие органы под определенными почвенными условиями поскольку из-за малого тепло вложения материал основы не теряет своих свойств.

Результаты сравнения этих методов позволяют выбирать оптимальное решение в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации сельскохозяйственного оборудования, способствуя повышению устойчивости производства и обеспечивая более эффективное использование ресурсов в сельском хозяйстве.

Цель исследования. Оценка относительной износостойкости материалов почворезущих деталей упрочненных двумя методами и сравнительная оценка ресурса и эффективности применения.

Условия, материалы и методы. Проведен расчет выбора конструктивно-материаловедческих параметров по разработанной С. А. Сидоровым [10] упрощенной методике двух видов упрочняющих материалов Р6М5 и ФБХ-6-2. Алгоритм основан на учете выраженной зависимости максимальной линейной и конструкционной износостойкости для оценки относительного линейного износа двухслойного почворезущего лезвия:

$$U_{\text{лин.1}} = U_{\text{двухсл.}} \cdot \left(\frac{K_{U_2}}{K_{U_1}} \right)^{0,5 \dots 0,6} \cdot \left[1 + K_{U_{\text{тв.спл.}}} \cdot \frac{h_{\text{тв.спл.}}}{b_{\text{осн}}} \right]^{0,7 \dots 0,8} \quad (1)$$

где $U_{\text{лин.1}}$ и $U_{\text{лин. двухсл.}}$ – линейные износы однородного и двухслойного почворезущих лезвий;

K_{U_2} – коэффициент относительной износостойкости материала основы двухслойной детали (стали) повышенной (или пониженной), по отношению к сравниваемому (K_{U_1}) материалу, износостойкости;

$K_{U_{\text{тв.спл.}}}$ – коэффициент относительной износостойкости материала упрочняющего твердосплавного слоя (относительно стали 30ХГСА); $h_{\text{тв.спл.}}$ – толщина слоя твердого сплава двухслойного лезвия, мм;

$b_{\text{осн}}$ – толщина материала основы двухслойного лезвия, мм.

По итоговым преобразованиям формула для расчёта толщины слоя твердого сплава принимает вид:

$$h_{\text{тв.спл.}} > \frac{1,38 b_{\text{осн}}}{K_{U_{\text{тв.спл.}}}} \quad (2)$$

При использовании плазменно-порошковой наплавки твердый сплав ФБХ-6-2с добавлением WC имеет усредненное значение $K_{U_{\text{тв.спл.}}}$ равное 4,05 и толщину основы $b_{\text{осн}} = 12$ мм.

При использовании технологий селективного лазерного спекания твердый сплав Р6М5 имеет усредненное значение $K_{U_{\text{тв.спл.}}}$ равное 6,5и толщину основы $b_{\text{осн}} = 12$ мм.

Количество износа двухслойного лезвия долота с исследуемыми материалами, учитывая изменение удельных нагрузок в результате внедрения новых конструктивно-материаловедческих решений, может быть приблизительно (с точностью 12-15%) определено по следующей зависимости:

$$U_{\text{лезв. двухсл.}}^{\text{лин.}} = \frac{\lambda(1,1 + 1,05 \cdot T^{1,25})}{K_{U_{\text{тв.спл.}}} \cdot h_{\text{тв.спл.}}^{0,5}} \cdot \tau \quad (3)$$

где λ – математическое описание изнашивающей способности почв (определяется по методике Сидорова С. А. [9] и с табличных значений),

T – твердость почвы на глубине обработки, МПа,

τ – наработка на долото, га.

Для упрощения расчётов была взята средняя наработка в 50 га и твердость почвы в 1 МПа.

Величину износа двухслойного лезвия долота, наплавленного твердым сплавом ПР-ФБХ-6-2 и Р6М5 рассчитываем по формуле 3:

$$U_{\text{лезв. двухсл.}}^{\text{лин.}} = \frac{0,64(1,1 + 1,05 \cdot 1^{1,25})}{6,5 \cdot 2,6^{0,5}} \cdot 50 = 6,5 \text{ мм}$$

Полученные результаты представлены в таблице 1.

При использовании селективного лазерного спекания как метода упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин экономия твердого сплава составляет 35% таблица 1.

Для проведения исследований в полевых условиях было изготовлено два варианта долот (рис.2, 4):

Опытные образцы из стали 30ХГСА с упрочняющим слоем Р6М5 нанесенным селективным лазерным спеканием.

Образцы рабочих органов, мелкосерийно выпускаемые из стали 30ХГСА с упрочняющим слоем ПР-ФБХ-6-2 +WC +Al нанесённым плазменно-порошковой наплавкой в среде сжатого воздуха.

Упрочнение экспериментальных образцов проводили методом селективного лазерного спекания (рис. 1) по соответствующим режимам.



Рис. 1 – Процесс нанесения упрочняющего материала на экспериментальный образец долота



Рис. 2 – Образец долота, упрочненный методом селективного лазерного спекания

Второй вариант упрочнения долот порошковой наплавкой в среде сжатого воздуха проводился на установке плазменно-рисунок 3.



Рис. 3 – Установка плазменно-порошковой наплавки в среде сжатого воздуха



Рис. 4 – Образец долота, упрочненный плазменно-порошковой наплавкой в среде сжатого воздуха

Была проведена технологическая операция термообработки (закалка с последующим отпуском) по необходимым параметрам и режимам для данных материалов и на определенном этапе изготовления. Учитывая тот факт, что закалку долота, на которое будет нанесен упрочняющий материал методом селективного лазерного спекания, по предварительным исследованиям нужно проводить перед нанесением материала, а плазменно-порошковое упрочнение проводится до термообработки.

Исследования проводили в АО Агрофирма «Суздальские зори» (Владимирская область, Суздальский р-н, с. Павловское). При проведении испытаний плуг ПЛН-8-35 агрегатировался с трактором К-744. Почвы представляли собой средний и тяжелый суглинок, твердость в период испытаний составляла на глубине 18-22 см 2,2...3,0 МПа, установочная глубина обработки – 20 см, скоростные режимы

работы устанавливались в пределах от 8 до 10 км/ч [11, 12, 13].

Долота упрочнённые материалами ФБХ-6-2 (рис. 4) и Р6М5 (рис. 2) были установлены на корпуса отвальных плугов с шириной 35 см, в количестве 16 штук, по 8 на каждый плуг каждого вида упрочняющего материала и технологии упрочнения. Эти плуги предназначены для эффективной обработки почв различной твердости, не превышающей 4 МПа, с абсолютной влажностью до 30%. Они также приспособлены к нагрузкам с почвенным удельным сопротивлением до 1,4 кг/см² и высотой растительных и пожнивных остатков до 25 см (в соответствии с требованиями СТО АИСТ 4.6-2010).

Результаты и обсуждение. Результаты сравнительных исследований по критерию износостойкости опытных и серийно выпускаемых долот плуга ПЛН 8-35 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сравнительных ресурсных исследований рабочих органов по критерию износостойкости почвообрабатывающих машин, изготовленных с использованием различных материалов и упрочняющих технологий

Марка материала долота	Марка материала наплавленного слоя	Номер корпуса плуга от навески трактора	Наработка, га	Длина долота (макс), b, мм	Относительный износ по длине, мм/га
1	2	3	4	5	6
опытные долота					
30ХГСА	Р6М5	1	0	170	-
			40,6	148,81	0,521
30ХГСА	Р6М5	2	0	170,4	-
			40,6	150,9	0,480
30ХГСА	Р6М5	3	0	170,6	-
			40,6	151,95	0,459
30ХГСА	Р6М5	4	0	170	-
			40,6	151,78	0,448
30ХГСА	Р6М5	5	0	170	-
			40,6	152	0,443
30ХГСА	Р6М5	6	0	169,3	-
			40,6	151,1	0,448
30ХГСА	Р6М5	7	0	168,6	-
			40,6	151,24	0,427
30ХГСА	Р6М5	8	0	169,6	-
			40,6	151,81	0,438
серийные долота					
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	1	0	169,8	-
			40,6	140,64	0,718
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	2	0	169,3	-
			40,6	144,9	0,6
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	3	0	170,4	-
			40,6	147,51	0,563
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	4	0	169,4	-
			40,6	147,16	0,547
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	5	0	171	-
			40,6	149,19	0,537
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	6	0	169,8	-
			40,6	148,42	0,526
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	7	0	170,6	-
			40,6	150,3	0,5
30ХГСА	ФБХ-6-2+WC+Al	8	0	170,2	-
			40,6	150,55	0,483

Линейный износ рабочих органов, представленный в таблице 2 был получен при наработке опытных и серийных долот 325 га на плуг, состоящий из 8 корпусов или 40 га на рабочий орган. Следует отметить, что при указанной наработке опытными долотами изготовленных из стали 30ХГСА с нанесенном

слоем материала Р6М5 методом селективного лазерного спекания не достигнуто предельного износа (рис. 5), а у серийных долот изготовленных из стали 30ХГСА с нанесенном слоем материала ФБХ 6-2 +WC +Al методом плазменно-порошковой наплавки эта наработка явилась предельной (рис. 6).



Рис. 5 – Новое и изношенное №1 опытное долото



Рис. 6 – Новое и изношенное №1 серийное выпускаемое долото

Эксплуатационные показатели и качество выполнения технологического процесса на вспашке среднесуглинистой почвы плугом ПЛН 8-35с опытными и серийными долотами близки по значению и находятся в пределах требований [14, 15, 16] СТО АИСТ 4.6-2010. Стоит отметить, что экспериментальные долота имеют улучшенную заглабляющую способность и эффективное формообразование, так как лезвие рабочего органа в процессе работы сохранило свою остроту с минимальной выраженной затылочной фаской, за счет этого при росте скорости обработки сохраняется равномерность хода агрегата по глубине в отличие от плуга оснащенного серийными рабочими органами. По проведенным исследованиям определения качества работы на двух скоростных режимах 8 и 10 км/ч агрегатами оснащенными опытными и серийными рабочими органами получили что, при установочной глубине обработки 20 см фактически получена у плуга с опытными рабочими органами 20,5 и 21, 2 см у плуга с серийными 20 и 19,6 см.

Испытаниями на надежность установлено, что интенсивность износа опытных долот значительно ниже серийных. Усредненная на 8 долот скорость износа получена: опытных – 0,458 мм/га, серийных – 0,559 мм/га (таблица 2).

Установлено, что по скорости износа опытные долота плуга ПЛН 8-35 значительно превосходят серийные. Износостойкость новых долот позволяет значительно увеличить ресурс плуга ПЛН 8-35 при обработке почвы на 18%.

Выводы. 1. При использовании селективного лазерного спекания как метода упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин экономия твердого сплава составляет 35%.

2. Установлено, что за счет формирования однородного, тонкого, износостойкого, упрочняющего слоя на рабочем органе происходит эффективное формообразование его лезвийной части, которая обеспечивает установленную глубины пахоты, не нарушая агротехнических показателей процесса

обработки почвы.

3. При испытании на надежность установили, что интенсивность износа опытных долот значительно ниже серийных. Средняя скорость износа на 8 долот составляет: опытных образцов – 0,458 мм/га, серийных образцов – 0,559 мм/га.

4. Эффективность использования новых материалов и метода (SLS) для упрочнения почворежущих рабочих органов в сравнении с долотами, упрочненных плазменным методом в эксплуатационных условиях, обеспечивает повышение ресурса (по износостойкости) опытных деталей на 18%.

Литература

1. Сидоров С.А. Сельхозмашиностроению - качественные материалы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 2. С. 41.
2. Миронов Д.А., А.К. Ламм, Р.К. Расулов. Оценка эффективности почвообрабатывающих рабочих органов по критерию износостойкости // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (65). С. 145-150.
3. 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.
4. Новые виды коррозионно-стойких биметаллов и технологии их производства / А.Ю. Измайлов, Я.П. Лобачевский, С.А. Сидоров и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 4. С. 7-12.
5. Новые износостойкие наплавочные материалы в сельскохозяйственном машиностроении / Я.П. Лобачевский, С.А. Сидоров, Д.А. Миронов и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 6. С. 27-31.
6. Increasing the wear resistance and other life characteristics of materials of tillage tools / S.A. Sidorov, D.A. Mironov, A.V. Mironova and other // Metallurgist. 2021. Vol. 65. № 5-6. PP. 593-601.
7. Liskin I.V., Mironov D.A., Panov A.I. Increasing the durability of ploughshares with wear resistant hardfacing. Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". 2019. № 1 (89). С. 39-44.
8. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines / S.A. Sidorov, D.A. Mironov, V.K. Khoroshenkov and other // Welding International. 2016. Vol. 30. № 10. PP. 808-812.
9. Сидоров С.А. Применение наноплазменных технологий нанесения покрытий и обработки материалов деталей сельхозмашин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. № 2. С. 42-44.
10. Результаты лабораторных исследований почворежущих рабочих органов / И.В. Лискин, Я.П. Лобачевский, Д.А. Миронов и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. № 4. С. 41-47.
11. Миронова А.В. Технологические и физико-механические свойства задерненных почв // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. № 1. С. 63-68.
12. Миронова А.В. Обработка задернелых и деградированных почв // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 2 (35). С. 57-62.
13. Лискин И.В., Миронова А.В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворежущих рабочих органов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 3. С. 53-58.
14. Влияние геометрических и установочных параметров плужных рабочих органов на агротехнические и силовые характеристики / С.А. Сидоров, Я.П. Лобачевский, Д.А. Миронов и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 2. С. 10-16.
15. Анализ тягового сопротивления элементов цилиндрического плужного корпуса / Я.П. Лобачевский, В.Ф. Комогорцев, С.И. Старовойтов и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 2. С. 11-15.
16. Лискин И.В., Миронов Д.А., Сидоров С.А. Равновесие плуга в продольно-вертикальной плоскости // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 6. С. 41-46.

Сведения об авторах:

Миронов Денис Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки цифровых двойников инновационных рабочих органов и оборудования в сельскохозяйственном производстве, e-mail: nano.otdel@mail.ru

Ламм Алексей Константинович – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории разработки цифровых двойников инновационных рабочих органов и оборудования в сельскохозяйственном производстве, e-mail.: nano.otdel@mail.ru

Расулов Рустам Касимович - младший научный сотрудник лаборатории разработки цифровых двойников инновационных рабочих органов и оборудования в сельскохозяйственном производстве, e-mail: nano.otdel@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF SELECTIVE LASER SINTERING METHOD FOR STRENGTHENING SOIL TILLAGE WORKING UNITS

D. A. Mironov, A. K. Lamm, R. K. Rasulov

Abstract. The functioning of agricultural machinery and equipment is an integral factor in ensuring the sustainability of production. Wear of the working units of tillage mechanisms is associated with a gradual change in their geometric and physical-mechanical characteristics, which in turn reduces the efficiency of tillage. One of the methods for solving this problem is to apply a protective layer of material that has increased wear resistance. Selective laser sintering (SLS) and plasma powder cladding are technologies for applying protective layers to the surface of agricultural machinery parts. A comparative analysis of these methods will allow us to assess their effectiveness and applicability in agricultural conditions. The results of comparing these methods will allow you to choose the optimal solution depending on the specific requirements and operating conditions of agricultural equipment. Calculation of the choice of design and material parame-

ters shows that when using selective laser sintering as a method of strengthening the working units of soil-cultivating machines, the savings in hard alloy will be 35%. It has been established that due to the formation of a homogeneous, thin, wear-resistant, strengthening layer on the working unit, the effective shaping of its blade part occurs, which ensures the established plowing depth without violating the agrotechnical parameters of the soil cultivation process. When testing for reliability, it was determined that the wear rate of the experimental bits was significantly lower than the serial ones. The average wear rate for 8 bits is: experimental samples - 0.458 mm/ha, serial samples - 0.559 mm/ha. The effectiveness of using new materials and the method (SLS) for strengthening soil-cutting working units in comparison with hardening by the plasma method under operating conditions will ensure an increase in the service life of experimental parts by 18%.

Key words: working units, tillage machines, economic efficiency of use, plasma-powder surfacing, 3D printing, selective laser sintering method.

References

1. Sidorov SA. [Agricultural machinery - high-quality materials]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2010; 2. 41 p.
2. Mironov DA, Lamm AK, Rasulov RK. [Assessing the effectiveness of soil-cultivating working units according to the criterion of wear resistance]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; 1 (65). 145-150 p.
3. Lobachevskiy YaP, Mironov SA, Mironova AV. [Main directions for increasing the service life of fast-wearing working parts of agricultural machines]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023; Vol.17. 1. 41-50 p.
4. Izmaylov AYu, Lobachevskiy YaP, Sidorov SA. [New types of corrosion-resistant bimetallics and technologies for their production]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2014; 4. 7-12 p.
5. Lobachevskiy YaP, Sidorov SA, Mironov DA. [New wear-resistant surfacing materials in agricultural engineering]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2014; 6. 27-31 p.
6. Sidorov SA, Mironov DA, Mironova AV. Increasing the wear resistance and other life characteristics of materials of tillage tools. *Metallurgist*. 2021; Vol.65. 5-6. 593-601 p.
7. Liskin IV, Mironov DA, Panov AI. Increasing the durability of ploughshares with wear resistant hardfacing. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2019; 1 (89). 39-44 p.
8. Sidorov SA, Mironov DA, Khoroshenkov VK. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. *Welding International*. 2016; Vol.30. 10. 808-812 p.
9. Sidorov SA. [Application of nanoplasma technologies for coating and processing materials of agricultural machine parts]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009; 2. 42-44 p.
10. Liskin IV, Lobachevskiy YaP, Mironov DA. [Results of laboratory studies of soil-cutting working parts]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018; Vol.12. 4. 41-47 p.
11. Mironova AV. [Technological and physical-mechanical properties of turfed soils]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022; Vol.16. 1. 63-68 p.
12. Mironova AV. [Treatment of soddy and degraded soils]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019; 2 (35). 57-62 p.
13. Liskin IV, Mironova AV. [Justification of an artificial soil environment for laboratory studies of wear and traction characteristics of soil-cutting working parts]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020; Vol.14. 3. 53-58 p.
14. Sidorov SA, Lobachevskiy YaP, Mironov DA. [Influence of geometric and installation parameters of plow working units on agrotechnical and power characteristics]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020; Vol.14. 2. 10-16 p.
15. Lobachevskiy YaP, Komogortsev VF, Starovoytov SI. [Analysis of traction resistance of elements of a cylindrical plow body]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016; 2. 11-15 p.
16. Liskin IV, Mironov DA, Sidorov SA. [Equilibrium of the plow in the longitudinal-vertical plane]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2014; 6. 41-46 p.

Authors:

Mironov Denis Aleksandrovich – Ph.D. of Technical Sciences, leading researcher of the Laboratory for the development of digital counterparts of innovative working parts and equipment in agricultural production, e-mail: nano.otdel@mail.ru
 Lamm Aleksey Konstantinovich – graduate student, junior researcher of the Laboratory for the development of digital counterparts of innovative working parts and equipment in agricultural production, e-mail.: nano.otdel@mail.ru
 Rasulov Rustam Kasimovich, junior researcher of the Laboratory for the development of digital counterparts of innovative working parts and equipment in agricultural production, e-mail.: nano.otdel@mail.ru
 Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.