

11. Varnakov V. V., Strel'tsov V. V., Popov V. N., Karpenkov V. F. Tekhnicheskii servis mashin sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya (Technical service of agricultural machines), M., Kolos, 2000, 256 p.
12. Kurochkin I. M., Dorovskikh D. V. Proizvodstvenno-tekhnicheskaya ekspluatatsiya MTP (Production and technical operation of the MTR), uchebnoe posobie, Tambov, Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012, 200 p.
13. Usanov A. Yu. Metodika rascheta effektivnosti ispol'zovaniya mashinno- traktornogo parka (Method of calculation of efficiency of use of machine-tractor fleet), Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika, 2010, No. 34 (199), pp. 30-32.
14. Mitev G. V. Experimental study of strip till machine, Agricultural machinery, V international scientific congress, Warna, 2017, pp. 18-22.
15. Zyapkov D. Position Reflektor for distribution of grass seeds for turf, Agricultural machinery, V international scientific congress, Warna, 2017, pp. 23-26.
16. Rybacki P. System oceny jakości serwisowania maszyn rolniczych (Agricultural machines servicing quality assessment system), Poznan, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, 2012, 170 p.

DOI 10.24411/2307-2873-2020-10001

УДК 621.791.927:620.178.16

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ

А. М. Кашфуллин, канд. техн. наук;

С. Г. Гурьянов, канд. техн. наук;

Е. В. Пепеляева, канд. техн. наук;

ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ,

ул. Петропавловская, 23, Пермь, Россия, 614990

E-mail: a.kashfullin@mail.ru

Аннотация. Рабочие органы почвообрабатывающих машин подвержены интенсивному абразивному износу, из-за чего их ресурс на сегодняшний день не удовлетворяет потребителей. Наличие абразивных частиц в почве при ее обработке приводит к износу режущих частей почвообрабатывающих машин. В работе представлены результаты исследований влияния технологических параметров дуговой наплавки в среде защитных газов на стойкость покрытий к изнашиванию незакрепленным абразивом. Исследования проводились на кафедре технического сервиса и ремонта машин в ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ совместно с ООО «ТСЗП», г. Москва. Наплавка осуществлялась с использованием порошковой проволоки системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y. Для оптимизации режимов дуговой наплавки использован четырехфакторный эксперимент для линейной модели в виде полуреплики 2^{4-1} по критериям ортогональности и ротатабельности. В качестве критерия оптимизации использовали характеристику стойкости наносимого покрытия к изнашиванию незакрепленным абразивом. Согласно результатам регрессионного анализа потеря массы покрытий возрастает с уменьшением тока дуги, а также уменьшением скорости наплавки.

Для нахождения оптимальных технологических параметров дуговой наплавки был применен метод крутого восхождения по критерию максимальной износостойкости покрытий. Получены следующие технологические параметры наплавки: ток дуги – 359 А; скорость подачи проволоки – 100 м/ч; скорость наплавки – 18,9 м/ч; расход защитного газа – 8 л/мин.

Ключевые слова: дуговая наплавка, порошковая проволока, планирование эксперимента, износостойкость.

Введение. Рабочие органы почвообрабатывающих машин подвержены интенсивному абразивному износу, из-за чего их ресурс, на сегодняшний день, не удовлетворяет потребителей [1, 2]. Наличие абразивных частиц в почве при ее обработке приводит к износу режущих частей почвообрабатывающих машин (лемеха, лапы культиваторов, диски борон, ножи фрез и другие) [3, 4].

Было установлено [5], что для защиты от абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин перспективно использование покрытий, наносимых дуговой наплавкой, в среде защитных газов порошковой проволокой системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y.

Применение порошковой проволоки на типовых режимах наплавки приводит к выгоранию легирующих элементов и насыщению кислородом расплавляемого металла, что приводит к снижению износостойкости покрытий.

Совместное влияние факторов на качество нанесенного покрытия при наплавке можно установить, используя метод планирования многофакторного эксперимента [6, 7].

Применение этого метода доказало свою эффективность как для процессов дуговой сварки [8, 9], так и для процессов дуговой наплавки [10, 11] в защитных газах. При этом в указанных работах исследовалось преимущественно влияние технологических параметров дуговой наплавки на коэффициент формы валика, величину зоны термического

влияния, а также коэффициент перемешивания наплавляемого материала и подложки. В то же время зависимость износостойкости наплавленных покрытий от параметров режима практически не исследовалась.

Методика. Для определения влияния технологических параметров дуговой наплавки на стойкость покрытий к абразивному изнашиванию были изготовлены образцы из стали с нанесенным покрытием из порошковой проволоки системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y [5]. В качестве подложки при наплавке покрытий использовалась сталь 20, размер образцов 25x45x10 мм.

При определении влияния технологических параметров наплавки на износостойкость покрытий применен четырехфакторный эксперимент для линейной модели в виде полуреплики 2^{4-1} по критериям ортогональности и ротатабельности [12]. Критерием оптимизации принята износостойкость покрытий по отношению к незакрепленному абразиву. Исследуемые факторы и интервалы их варьирования приведены в таблице 1 и соответствуют типовой технологии дуговой наплавки. Условия, при которых проводились эксперименты, приведены в таблице 2. При экспериментах приняты следующие фиксированные параметры дуговой наплавки: диаметр наплавляемой проволоки (2 мм), вылет проволоки из мундштука (20 мм), угол подачи проволоки (45° к горизонтали), а также длина дуги (5 мм).

Таблица 1

План эксперимента

Фактор	Наименование	Символ	Уровни			Интервал
			нижний	основной	верхний	
x ₁	Ток дуги, А	I	250	300	350	50
x ₂	Скорость подачи проволоки, м/ч	W	100	120	140	20
x ₃	Скорость наплавки, м/ч	V	10	14	18	4
x ₄	Расход защитного газа, л/мин	Q	8	10	12	2

Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью инструмента Design of experiments и Multiple Regression программного пакета STATISTICA 10 [13].

Наплавка покрытий производилась с помощью комплекта сварочного оборудования:

выпрямителя ВДУ-601, механизма подачи проволоки ПДГО-601, горелки сварочной RU-600. Основными регулируемыми параметрами являлись: сила тока дуги [А], скорость подачи проволоки [м/ч] скорость наплавки [м/ч], расход защитного газа [л/мин].

Таблица 2

Условия проведения опытов

№ эксперимента	Факторы эксперимента				Критерий оптимизации
	x ₁ , А	x ₂ , м/ч	x ₃ , м/ч	x ₄ , л/мин	
1	250	100	10	8	0,032
2	350	100	18	8	0,017
3	250	100	18	12	0,023
4	250	140	10	12	0,036
5	350	140	10	8	0,022
6	350	100	10	12	0,028
7	250	140	18	8	0,021
8	350	140	18	12	0,019

Износостойкость определялась в соответствии со стандартом ASTM G65 режим В (резиновый диск – кварцевый песок), на специализированном стенде, рисунок 1*. Были испытаны пять образцов для каждого режима наплавки.

Результаты испытаний на износ представлены в виде потери массы образцов в граммах. Для взвешивания образцов использовались аналитические весы ES 520A PRECISA.

*Исследования выполнены совместно с к.т.н. Неужиным С.В., ООО «ТСЗП» г. Москва

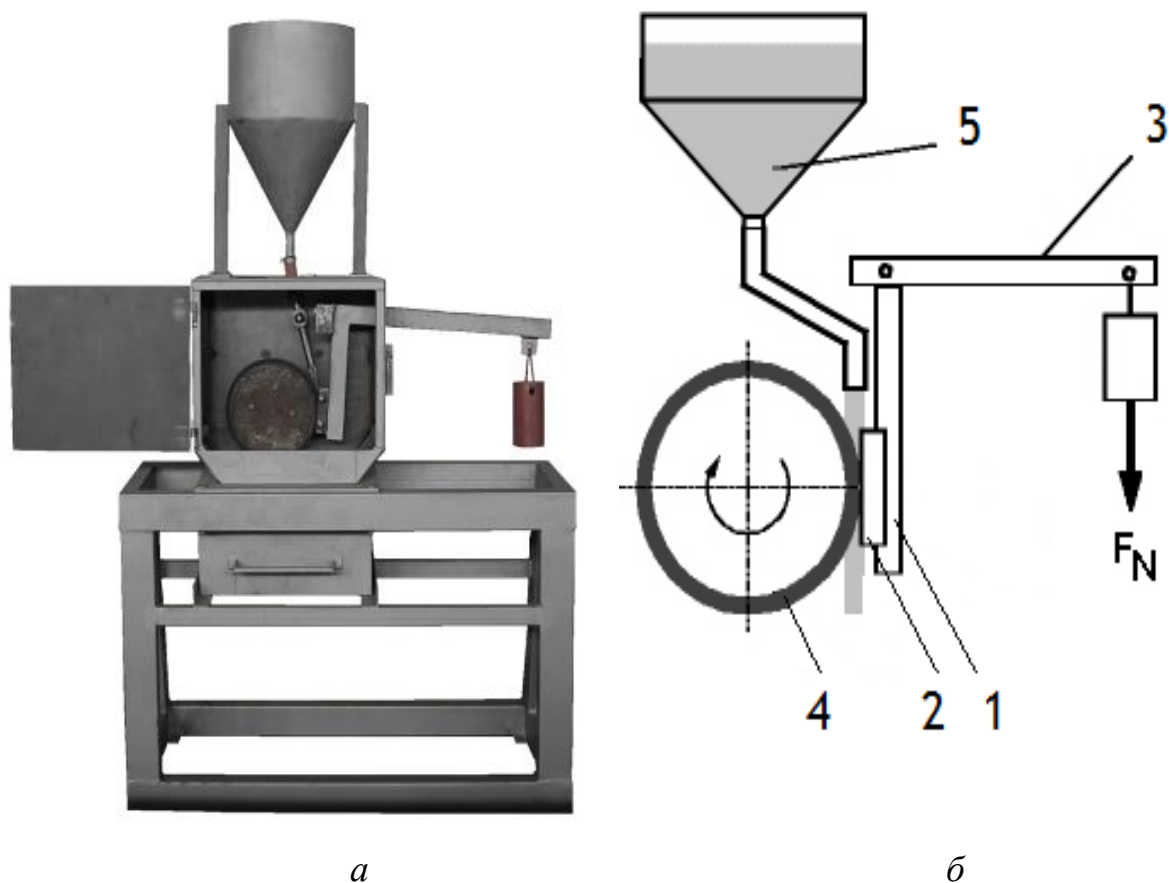


Рис. 1. Стенд для испытаний на абразивную стойкость:
 а) внешний вид, б) схематическое изображение стенда:
 1 – держатель; 2 – образец; 3 – рычаг; 4 – резиновый диск;
 5 – дозирующее устройство.

В качестве незакрепленного абразивного материала был взят гранулированный кварцевый песок размерами зерна и шагом варьирования от 150 до 425 мкм. Для обеспечения необходимого размера зерна абразива, песок просеивался. Для этого использовалась просеивающая машина «HAVER EML 200 Digital Plus T». Перед просеиванием песок высушивался путем нагрева до 100° С и выдержке в течение 90 мин., со-

держание влаги в песке не превышало 0,5 % от общей массы. Испытания проводились по следующему режимам: длительность испытаний – 10 минут; нагрузка – 130 Н; скорость вращения диска – 200 об/мин.

Результаты. Результаты экспериментальных данных регрессионного анализа по износостойкости нанесенных покрытий приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3

Оценка адекватности линейной модели

Фактор	Суммы квадратов (SS)	сс	Средние квадраты (MS)	F	p
(0) Св. член	0,000208663265	1	0,000208663265	35,7708455	0,00935640294
(1) I, А	0,0000845	1	0,0000845	14,4857143	0,0318741951
(2)W, м/ч	0,0000005	1	0,0000005	0,0857142857	0,788779982
(3)V, м/ч	0,0001805	1	0,0001805	30,9428571	0,0114624326
(4)Q, л/мин	0,0000245	1	0,0000245	4,2	0,13284184
Ошибка SS	0,0000175	3	0,00000583333333		

Коэффициенты линейного уравнения регрессии по t-критерию Стьюдента статистически значимы по критерию Фишера для числа степеней свободы при заданном р-

уровне значимости, кроме определяющего влияние скорости подачи проволоки и расхода защитного газа.

Таблица 4

Оценка статистической значимости регрессионных коэффициентов

Фактор	1	2	3	4	5	6
Св. член			0,053625	0,008966	5,98087	0,009356
I, А	-0,524211	0,137732	-0,000065	0,000017	-3,80601	0,031874
W, м/ч	-0,040324	0,137732	-0,000013	0,000043	-0,29277	0,788780
V, м/ч	-0,766154	0,137732	-0,001188	0,000213	-5,56263	0,011462
Q, л/мин	0,282267	0,137732	0,000875	0,000427	2,04939	0,132842

Примечание: В приведенной таблице номера столбцов соответствуют параметрам:

1 – стандартизованные регрессионные коэффициенты Бета; 2 – стандартные ошибки Бета; 3 – обычные регрессионные коэффициенты В; 4 – стандартные ошибки В; 5 – $t(3)$; 6 – p-уров.

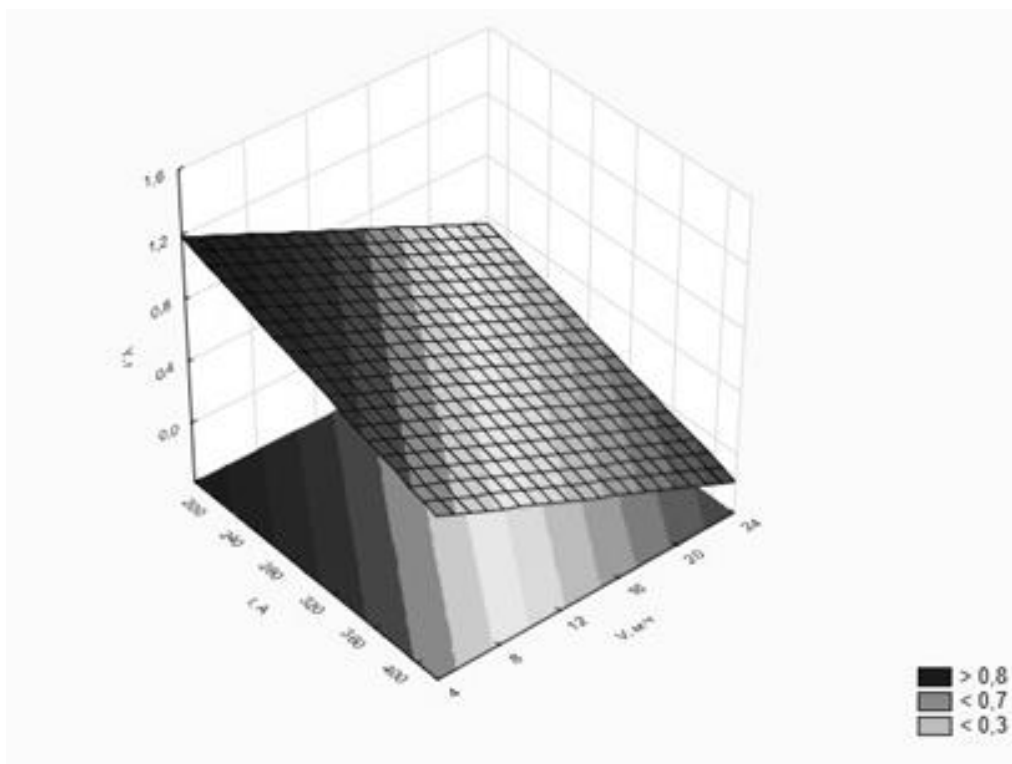
Результаты регрессионного анализа (табл. 4) показывают, что зависимость потери массы покрытия от технологических параметров дуговой наплавки при изнашивании незакрепленным абразивом описывается уравнением:

$$y = -0,52x_1 - 0,77x_3,$$

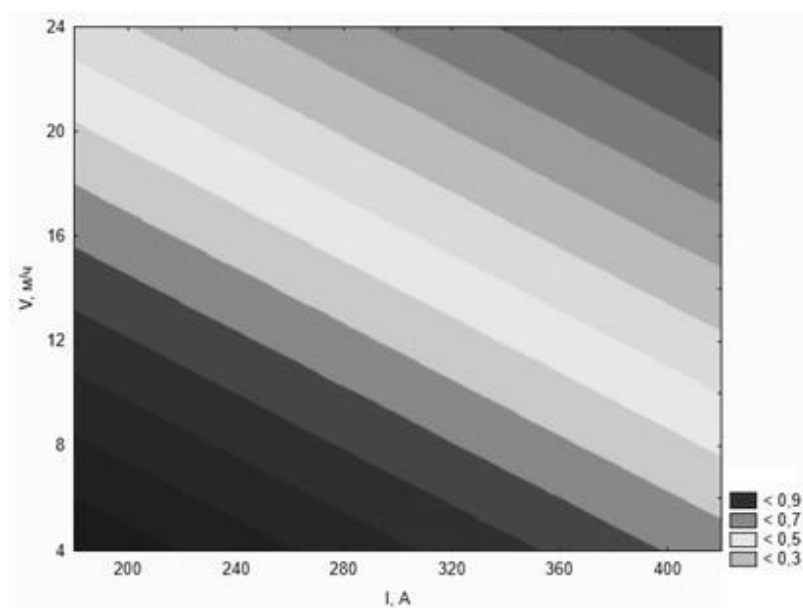
где x_1 – ток дуги, А; x_3 – скорость наплавки, м/ч.

Результаты получены с применением графиков поверхности и карт линий уровня отклика (рис. 2). Потеря массы нанесенных покрытий увеличивается с уменьшением скорости наплавки и тока дуги. Соответственно, с их увеличением стойкость повышается.

Ранее, по результатам многочисленных исследований, было установлено, что данные параметры имеют решающее влияние на коэффициент формы валика, величину зоны термического влияния, а также коэффициент перемешивания наплавляемого материала и подложки [14]. Вместе с тем, вероятно существенное влияние тока дуги и скорости наплавки на скорость кристаллизации наплавляемого металла, его фазовый и структурный состав, а, следовательно, и на стойкость к износу как структурно-чувствительную характеристику. Указанное предположение требует дальнейших исследований для его подтверждения.



a



б

Рисунок 2. График поверхности и карта линии уровня отклика для факторов тока дуги (*a*) и скорости наплавки (*б*)

Применение метода крутого восхождения позволило определить оптимальные технологические параметры дуговой

наплавки по критерию максимальной износостойкости покрытий, таблица 5.

Таблица 5

Оптимизация режимов наплавки методом крутого восхождения

Характеристики	Факторы	
	x_1 , А	x_3 , м/ч
Нулевой уровень, x_{i0}	350	18
Интервал варьирования, Δx_i	50	4
Коэффициенты, b_i	0,52	0,77
Произведение, $b_i \Delta x_i$	26	3,08
Шаг h_a при изменении базового фактора x_1 на 10	10	0,31
Округление шага варьирования	3	0,3
Крутое восхождение	Переменная состояния	
x_1	x_3	\bar{y}
353	18,3	0,015
356	18,6	0,013
359	18,9	0,012

В результате определены оптимальные параметры наплавки покрытий из порошковой проволоки Fe-Cr-B-Al-Y: ток дуги – 359 А; скорость подачи проволоки – 100 м/ч; скорость наплавки – 18,9 м/ч; расход защитного газа – 8 л/мин; при этом потеря массы покрытия составила 0,012 г.

Выводы. В результате выполнения работы определены технологические параметры дуговой наплавки в защитных газах порошковых проволок системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y, влияющие на стойкость получаемых покрытий к изнашиванию незакрепленным абразивом, а именно ток дуги и скорость наплавки.

Согласно результатам регрессионного анализа потеря массы покрытий возрастает с уменьшением тока дуги, а также уменьшением скорости наплавки. С их увеличением износостойкость, следовательно, повышается.

Вероятно, данные параметры имеют влияние не только на коэффициент формы валика, величину зоны термического влияния, а также

коэффициент перемешивания наплавляемого материала и подложки, но и на скорость кристаллизации наплавляемого металла, его фазовый и структурный состав, а, следовательно, и на стойкость к износу как структурно-чувствительную характеристику.

В частности, возможно влияние на дисперсность образующихся при кристаллизации наплавляемого металла упрочняющих фаз комплексных боридов и карбидов, определяющих износостойкость покрытий.

На основе полученных регрессионных зависимостей выполнена оптимизация режимов наплавки порошковых проволок по критерию наименьшей потери массы получаемых покрытий (и их наибольшей износостойкости).

Оптимизированные режимы наплавки (ток дуги – 359 А; скорость подачи проволоки – 100 м/ч; скорость наплавки – 18,9 м/ч; расход защитного газа – 8 л/мин) позволяют уменьшить потерю массы покрытия до 0,012 г, и, следовательно, увеличить его износостойкость.

Статья выполнена в рамках НИОКР кон- курсу «УМНИК» (госконтракт № 5634 технической сфере (Фонд содействия иннова- циям).

Литература

1. Михальченко А. М. Износы культиваторных лап посевного комплекса «МОРРИС» // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 10. С. 55-58.
2. Михальченко А. М., Соловьев С. А., Новиков А. А. Об одной причине низкого ресурса деталей рабочих органов отечественных почвообрабатывающих орудий // Труды ГОСНИТИ. М., 2014. Т. 117. С. 127-132.
3. Михальченко А. М. Особенности изнашивания и ресурс восстановленных импортных составных лемехов при пахоте на супесчаных почвах // Техника и оборудование для села. 2017. № 11. С. 37-40.
4. Результаты полевых испытаний рабочих органов почвообрабатывающих машин упрочненных порошковыми композициями / А.Ф. Фаюшин, Р.Р. Хакимов, А.А. Тункин [и др.] // Труды ГОСНИТИ. М., 2015. Т. 118. С. 214-217.
5. Кашфуллин А. М., Пепеляева Е. В., Гурьянов С. Г., Фаюшин А. Ф. Формирование структуры и износостойкость наплавленных покрытий с боридным упрочнением // Пермский аграрный вестник. 2019. № 2 (26). С. 15-23.
6. Кулик А. Я., Борисов Ю. С., Мнухин А. С., Никитин М. Д. Газотермическое напыление композиционных порошков. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
7. Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля. Л.: Машиностроение, 1977. 168 с.
8. Sonasale P. An Approach to Optimize MIG Welding Parameters by Using Design of Experiments // Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). 2014. Volume 11 (6 IV). Pp. 72-84.
9. Turner L. Influence of Gas Metal Arc Welding Parameters on the Bead Properties in Automatic Cladding / L. Turner [et al.] // Journal of Welding and Joining. 2017. Vol. 35 (1). Pp. 16-25.
10. Nouri M. Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding / M. Nouri [et al.] // Journal of Materials Science and Technology. 2007. Vol. 23 (6). Pp. 817-822.
11. Ravi P. Study and Investigations on Process Parameters for Bead Geometry during Cladding by Pulsed MIG Welding Process // International Review of Mechanical Engineering. 2014. Vol. 8 (4). Pp. 722-729.
12. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. М.: Metallurgy, 1969. 157 с.
13. STATISTICA: Руководство пользователя. Copyright Stat Soft, 2011. 225 с.
14. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / А. И. Акулов, В. П. Алехин, С. И. Ермаков [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 560 с.

INFLUENCE OF ARC SURFACING TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE WEAR RESISTANCE OF APPLIED COATINGS

A. M. Kashfullin, Cand. Tech. Sci.

S. G. Guryanov, Cand. Tech. Sci.

E. V. Pepelyaeva, Cand. Tech. Sci.

Perm State Agro-Technological University,
23, Petropavlovskaya St., Perm, Russia, 614990
E-mail: a.kashfullin@mail.ru

ABSTRACT

Working bodies of soil-cultivation machines are subject to intensive abrasive wear, which is why their resource does not satisfy consumers today. The presence of abrasive particles in the soil during its processing leads to wear of the cutting parts of machines bodies. The influence of technological parameters of arc surfacing on the abrasive wear resistance of coatings formed from Fe-Cr-B-Al-Y cored

wire was studied. To optimize the arc surfacing technological parameters, a four-factor experiment was used for a linear model in the form of a 24-1 semi-replica based on orthogonality and rotatability criteria. The resistance to abrasive wear in a loose abrasive was used as an optimization criterion. It was shown, according to the results of the regression analysis, that the wear resistance of surfaced coatings is most strongly influenced by arc current, as well as the speed of surfacing. The loss of coatings mass increases with a decrease of the arc current, as well as with a decrease of the surfacing speed. To find the optimal technological parameters of arc surfacing, the simplex method according to the criterion of maximum wear resistance of coatings is applied. The following technological parameters of surfacing were obtained: arc current 359 A; wire feed speed 100 m/h; surfacing speed 18.9 m/h; protective gas mass flow 8 l/min.

Key words: arc surfacing, cored wire, design of experiments, wear resistance.

References

1. Mikhal'chenkov A. M. Iznosy kul'tivatornykh lap posevnogo kompleksa «MORRIS» (Wear of cultivator paws of "MORRIS" sowing complex), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2013, No. 10, pp. 55-58.
2. Mikhal'chenkov A. M., Solov'ev S. A., Novikov A. A. Ob odnoi prichine nizkogo resursa detalei rabochikh organov otechestvennykh pochvoobrabatyvayushchikh orudii (A reason for the low resource of parts of the working bodies of domestic soil processing tools), *Trudy GOSNITI, M.*, 2014, T. 117, pp. 127-132.
3. Mikhal'chenkov A. M. Osobennosti iznashivaniya i resurs vosstanovlennykh importnykh sostavnykh lemekhov pri pakhote na supeschatykh pochvakh (Features of wear and life of restored imported composite ploughshare in case of ploughshare soils), *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*, 2017, No. 11, pp. 37-40.
4. Fayurshin A. F. Rezultaty polevykh ispytaniy rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin uprochnennykh poroshkovymi kompozitsiyami (Results of field tests of working elements of tillage machines reinforced with powder compositions), A. F. Fayurshin, R. R. Khakimov, A. A. Tunkin [i dr.], *Trudy GOSNITI, M.*, 2015, T. 118, pp. 214-217.
5. Kashfullin A. M., Pepelyaeva E. V., Gur'yanov S. G., Fayurshin A. F. Formirovanie struktury i iznosostoikost' naplavlennykh pokrytii s boridnym uprochneniem (Formation of structure and wear resistance of built-up coatings with boride hardening), *Permskii agrarnyi vestnik*, 2019, No. 2 (26), pp. 15-23.
6. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov (Gas thermal spraying of composite powders), L., Mashinostroenie, 1985, 199 p.
7. Nikitin M. D., Kulik A. Ya., Zakharov N. I. Teplozashchitnye i iznosostoikie pokrytiya detalei dizelya (Heat-proof and wear-resistant coatings of diesel engine parts), L., Mashinostroenie, 1977, 168 p.
8. Sonasale P. An Approach to Optimize MIG Welding Parameters by Using Design of Experiments, *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 2014, Vol. 11 (6 IV), pp. 72-84.
9. Ternier L. Influence of Gas Metal Arc Welding Parameters on the Bead Properties in Automatic Cladding, L. Ternier [et al.], *Journal of Welding and Joining*, 2017, Vol. 35 (1), pp. 16-25.
10. Nouri M. Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding, M. Nouri [et al.], *Journal of Materials Science and Technology*, 2007, Vol. 23 (6), pp. 817-822.
11. Ravi P. Study and Investigations on Process Parameters for Bead Geometry during Cladding by Pulsed MIG Welding Process, *International Review of Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 8 (4), pp. 722-729.
12. Adler Yu. P. Vvedenie v planirovanie eksperimenta (Introduction to experiment planning), M., Metallurgiya, 1969, 157 p.
13. STATISTICA: Rukovodstvo pol'zovatelya (STATISTICA: User's guide), Copyright Stat Soft, 2011, 225 p.
14. Akulov A. I., Alekhin V. P., Ermakov S. I. [i dr.] Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavlaniem i termicheskoi rezki (Technology and equipment for melting welding and thermal cutting), M., Mashinostroenie, 2003, 560 p.