

DOI

УДК 621.785.5

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЛЕКСНОГО
МИКРОПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И
ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Н. Р. Адигамов, И. Х. Гималтдинов, И. Г. Галиев, А. В. Гриценко, Ю. Ф. Казаков

Реферат. На сегодняшний день довольно остро стоит проблема поддержания работоспособности сложных современных отечественных и зарубежных сельскохозяйственных машин. Рабочие органы сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин работают в агрессивной абразивной среде, что приводит к их интенсивному износу и, как следствие, к потере геометрической формы. Это, в свою очередь, ведет к нарушению агротехнических требований, что существенно влияет на урожайность возделываемых культур. Серийные рабочие органы почвообрабатывающих машин выполняют из легированных сталей типа СТ65Г с рабочей твердостью HRC 55...60. Цель исследований – повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, путём использования технологии комплексного микроплазменного упрочнения, с разработкой методики определения рациональных режимов обработки рабочих поверхностей. Для оценки эффективности комплексного упрочнения лабораторных образцов были проведены исследования элементарного состава упрочненного слоя. В качестве лабораторных образцов использовали пластины из стали марки СТ65Г. Упрочнение осуществляли с использованием различных сочетаний металлокерамических порошков и режимов микроплазменного упрочнения. Определение износостойкости проводили на машине трения 77 МТ-1. Наилучшие результаты отмечены после вибродугового упрочнения с последующим электроискровым легированием и использованием металлокерамического порошка, состоящего на 80% из матричного порошка ПГ-10Н-01 и на 20% из карбида бора В4С. На основе показателей режимов упрочнения построены интерполяционные полиномы Лагранжа, которые описывают зависимость величины износа образца от силы тока и напряжения, разработан алгоритм определения рациональных режимов упрочнения для достижения максимальной износостойкости исследуемых образцов. Микротвердость поверхности изделий при электроискровом упрочнении повышалась до 2 раз, а при вибродуговом в комплексе с электроискровым легированием и использованием специальных паст с металлокерамическими порошками – более чем в 3 раза. Глубина упрочненного слоя поверхности при комплексном упрочнении составляет порядка 0,3 мм.

Ключевые слова: упрочнение, износостойкость, лабораторные образцы, твердость, модели, полиномы Лагранжа, режимы обработки.

Введение. На сегодняшний день весьма актуальная проблема при восстановлении и изготовлении рабочих органов и деталей сельскохозяйственных машин – обеспечение заданных физико-механических свойств их рабочих поверхностей, а именно износостойкости [1, 2, 3].

Рабочие органы сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин работают в агрессивной абразивной среде, что приводит к их интенсивному износу и, как следствие, к потере геометрической формы.

Это, в свою очередь, ведет к нарушению

агротехнических требований, что существенно влияет на урожайность возделываемых культур [4, 5].

Обычно твердость заводских рабочих органов составляет HRC 55...60 (6,0...8,0 ГПа). При этом известно, что почвы (в зависимости от типа) содержат от 36 до 78% абразивных фракций (полевой шпат, гранит, кварц, роговые обманки, слюды, рудные минералы), твердость которых составляет 7,2...11,0 ГПа, что указывает на недостаток твердости поверхности серийно изготавливаемых рабочих органов и приводит к их износу (рис. 1).

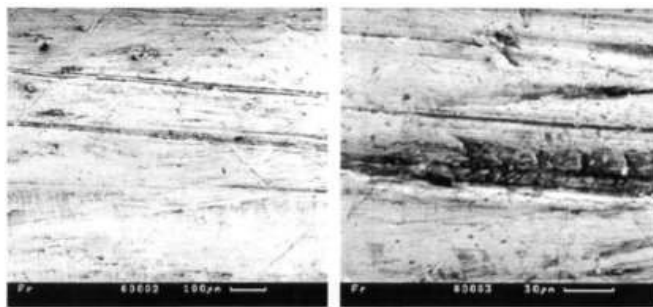


Рис. 1 – Следы абразивного изнашивания (фрагмент рабочей поверхности лапы культиватора (x100))

Комплексные технологии микроплазменного упрочнения рабочих органов и деталей

СХМ, предусматривает использование вибродугового и электроискрового

упрочнения в сочетании с применением металлокерамических порошков различного состава [6, 7, 8]. Их также можно использовать при восстановлении и изготовлении деталей топливной аппаратуры, деталей газораспределительного механизма и турбокомпрессоров дизельных двигателей [9, 10, 11].

Цель исследований – повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, путём использования технологии комплексного микроплазменного упрочнения, с разработкой методики определения рациональных режимов обработки рабочих поверхностей.

Условия, материалы и методы. Упрочнение опытных образцов по ранее разработанной методике осуществляли на кафедре эксплуатации и ремонта машин Казанского ГАУ на соответствующем оборудовании.

Для определения рациональных режимов и составов металлокерамических порошков были исследованы пять упрочнённых образцов и один контрольный образец из стали 65 Г (рис. 2). Рассматривали следующие варианты: вибродуговое упрочнение

с последующим электроискровым упрочнением; вибродуговое упрочнение с металлокерамическим порошком (МКП) ПГ-10Н-01; вибродуговое упрочнение с последующим электроискровым легированием и МКП, содержащим 80% ПГ-10Н-01 и 20% В₄С (карбид бора); вибродуговое упрочнение с МКП, содержащим 20% ПГ-10Н-01 и 80% В₄С; электроискровое легирование с последующим вибродуговым упрочнением.

Испытания проводили согласно действующей методике [12, 13, 14]. Для определения наиболее износостойких образцов использовали машину трения 77МТ-1.

Основным показателем оценки была потеря массы образца при равных условиях работы машины трения, то есть величина износа – обратная характеристика износостойкости покрытия.

В качестве контртела при испытании на износостойкость были взяты абразивные бруски марки ЧАЗ-38-12С1НБ, которые крепили в нижней части стакана машины трения [15, 16]. Сравнение проводили с образцом без упрочнения.

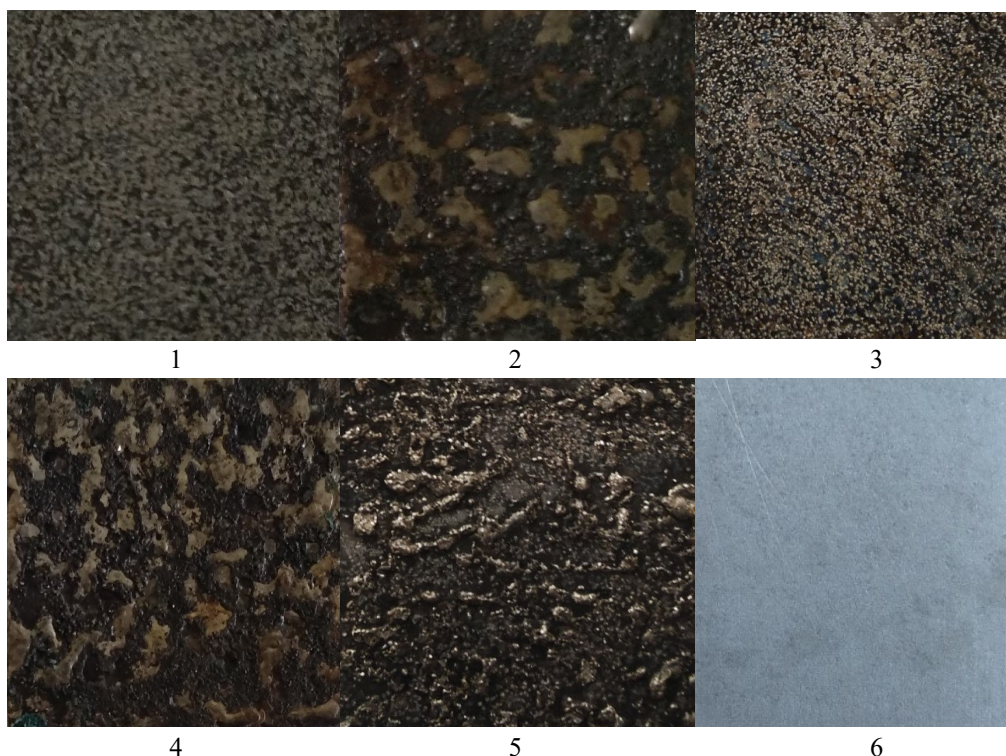


Рис. 2 – Общий вид образцов в различных сочетаниях комбинированных технологий микроплазменного упрочнения: 1 – вибродуговое упрочнение с последующим электроискровым упрочнением; 2 – вибродуговое упрочнение с металлокерамическим порошком (МКП) ПГ-10Н-01; 3 – вибродуговое упрочнение с последующим электроискровым легированием и МКП, содержащим 80% ПГ-10Н-01 и 20% В₄С (карбид бора); 4 – вибродуговое упрочнение с МКП, содержащим 20% ПГ-10Н-01 и 80% В₄С; 5 – электроискровое легирование с последующим вибродуговым упрочнением; 6 – неупрочнённый

Морфологический состав упрочнённых лабораторных образцов изучали в «Институте органической и физической химии им. А. Е. Арбузова». По результатам этих исследований также было установлено, что глубина

структурно-изменённого упрочнённого слоя составляет порядка 0,3 мм.

Обработку результатов лабораторных исследований на упрочнённых образцах осуществляли с использованием моделей,

которые дают возможность наблюдать соответствие между показателями износа Z_i и варьируемыми входными параметрами (сила тока k и напряжение φ), которые задаются эмпирической функцией двух переменных $f(x,y)$. Для определения вида этой функции использовали интерполяционные полиномы Лагранжа.

Для построения математических моделей использовали результаты лабораторных исследований по определению показателей величины износа в зависимости от напряжения φ и

силы тока упрочнения k , полученные при проведении лабораторных исследований.

Результаты и обсуждение. Самая большая износостойкость (табл. 1) отмечена у образца, обработанного вибродуговым упрочнением с последующим электроискровым легированием после нанесения пасты содержащей 80% ПГ-10Н-01 и 20% В4С. Она была выше, чем у контрольного образца, в 3 раза. Это объясняется двойным упрочнением и наличием большого количества легирующих элементов [17].

Таблица 1 – Результаты испытания на износостойкость

| Образец | Масса образца, г | | Величина износа, мг | Скорость изнашивания, г/ч | Износостойкость относительно контрольного образца |
|---|------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|---|
| | до испытаний | после испытаний | | | |
| Вибродуговое упрочнение с последующим электроискровым упрочнением | 90,153 | 90,1435 | 0,0095 | 0,019 | 2,427 |
| Вибродуговое упрочнение с МКП ПГ-10Н-01 | 91,354 | 91,344 | 0,01 | 0,02 | 2,3 |
| Вибродуговое упрочнение с последующим электроискровым легированием и МКП содержащей 80% ПГ-10Н-01 и 20% В4С | 91,756 | 91,7485 | 0,0075 | 0,015 | 3,067 |
| Вибродуговое упрочнение с МКП содержащей 20% ПГ-10Н-01 и 80% В4С | 91,896 | 91,8875 | 0,0085 | 0,017 | 2,706 |
| Электроискровое легирование с последующим вибродуговым упрочнением | 90,7532 | 90,7425 | 0,0105 | 0,021 | 2,19 |
| Неупрочненный | 89,345 | 89,322 | 0,023 | 0,046 | 1 |

Исследование интерполяционных полиномов Лагранжа дает возможность установить коррелированную взаимосвязь между входными факторами – режимами упрочнения и функции отклика – величиной износа лабораторного образца. Для решения этой задачи проводится

интерполяция функции двух переменных факторов $(x_0...x_4)$ и $(y_0...y_5)$ (табл. 2). Введем следующие обозначения: Z_i – значение точек поверхности, характеризующих величину износа; $f(k_i, \varphi_i)$ – функция, характеризующая напряжение $\varphi_i = x_i$ и силу тока $k_i = y_i$.

Таблица 2 – Общий вид кодированных значений входных факторов $(x_0...x_4)$ и $(y_0...y_5)$ и функции отклика характеризующая величину износа (Z_i)

| Сила тока | Напряжение | | | | |
|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| y_0 | $Z_{0,0}$ | $Z_{0,1}$ | $Z_{0,2}$ | $Z_{0,3}$ | $Z_{0,4}$ |
| y_1 | $Z_{1,0}$ | $Z_{1,1}$ | $Z_{1,2}$ | $Z_{1,3}$ | $Z_{1,4}$ |
| y_2 | $Z_{2,0}$ | $Z_{2,1}$ | $Z_{2,2}$ | $Z_{2,3}$ | $Z_{2,4}$ |
| y_3 | $Z_{3,0}$ | $Z_{3,1}$ | $Z_{3,2}$ | $Z_{3,3}$ | $Z_{3,4}$ |
| y_4 | $Z_{4,0}$ | $Z_{4,1}$ | $Z_{4,2}$ | $Z_{4,3}$ | $Z_{4,4}$ |
| y_5 | $Z_{5,0}$ | $Z_{5,1}$ | $Z_{5,2}$ | $Z_{5,3}$ | $Z_{5,4}$ |

Алгоритм обработки результатов с использованием интерполяционных полиномов Лагранжа для определения минимальной величины износа при различных режимах обработки заключается в интерполяции функции $Z_n = qn(x)$ при фиксированном уп на отрезке $x_0...x_4$ (см. табл. 2). В результате получим полином Лагранжа следующего вида: $\{P(x)\}$, где n – номер уровня рассечения исследуемой поверхности от 0 до 5, $x_0...x_4$ – значение вели-

чины напряжения при упрочнении и $y_0...y_5$ – значение величины силы тока.

Для уровня первой фиксации при фиксированном значении y_0 полином будет выглядеть следующим образом:

$$P(x) = Z_{00} \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + Z_{01} \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} + Z_{02} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + Z_{03} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} + Z_{04} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)} \quad (1)$$

Для первого уровня при фиксированном y_1 :

$$P(x) = Z_{10} \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + Z_{11} \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} +$$

$$Z_{12} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + Z_{13} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} +$$

$$Z_{14} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)} \quad (2)$$

Для второго уровня при фиксированном y_2 :

$$P(x) = Z_{20} + \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + Z_{21} \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} +$$

$$Z_{22} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + Z_{23} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} +$$

$$Z_{24} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)} \quad (3)$$

Для третьего уровня при фиксированном y_3 :

$$P(x) = Z_{30} \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + Z_{31} \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} +$$

$$Z_{32} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + Z_{33} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} +$$

$$Z_{34} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)} \quad (4)$$

Таблица 3 – Зависимость исследуемых показателей износа при различных напряжении и силы тока

| y_i | y_0 | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z_i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | P^4 | P^4 | P^4 | P^4 | P^4 | P^4 |

При рассечении исследуемой поверхности по заданным уровням в месте пересечения секущей плоскости и исследуемой поверхности при фиксированном значении X образуются кривые, характеризующие зависимость износа образца (Z_i) от силы тока (y_i) при фиксированном значении напряжения (x_i) (рис. 3).

Для получения исследуемой поверхности проинтерполируем функцию $Z = q(y)$ на отрезке $y_0 \dots y_5$.

$$P_5(x, y) = P(x) \frac{(y-y_1)(y-y_2)(y-y_3)(y-y_4)(y-y_5)}{(y_0-y_1)(y_0-y_2)(y_0-y_3)(y_0-y_4)(y_0-y_5)} +$$

$$P(x) \frac{(y-y_0)(y-y_2)(y-y_3)(y-y_4)(y-y_5)}{(y_1-y_0)(y_1-y_2)(y_1-y_3)(y_1-y_4)(y_1-y_5)} +$$

$$P(x) \frac{(y-y_0)(y-y_1)(y-y_3)(y-y_4)(y-y_5)}{(y_2-y_0)(y_2-y_1)(y_2-y_3)(y_2-y_4)(y_2-y_5)} +$$

$$P(x) \frac{(y-y_0)(y-y_1)(y-y_2)(y-y_4)(y-y_5)}{(y_3-y_0)(y_3-y_1)(y_3-y_2)(y_3-y_4)(y_3-y_5)} +$$

$$P(x) \frac{(y-y_0)(y-y_1)(y-y_2)(y-y_3)(y-y_5)}{(y_4-y_0)(y_4-y_1)(y_4-y_2)(y_4-y_3)(y_4-y_5)} +$$

$$P(x) \frac{(y-y_0)(y-y_1)(y-y_2)(y-y_3)(y-y_4)}{(y_5-y_0)(y_5-y_1)(y_5-y_2)(y_5-y_3)(y_5-y_4)} \quad (7)$$

Такая последовательность формализации процесса интерполирования, дает возможность исследовать аналитические связи между показателями режимов упрочнения и величины износа. В дальнейшем, исследуя полученную поверхность методом рассечения, можно определить минимальные показатели износа при различных режимах упрочнения образцов.

В результате математического моделирования режимов упрочнения и показателей износа лабораторных образцов были получены уравнения поверхности, исследование которых позволяет рекомендовать рациональные

Для четвертого уровня при фиксированном y_4 :

$$P(x) = Z_{40} \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + Z_{41} \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} +$$

$$Z_{42} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + Z_{43} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} +$$

$$Z_{44} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)} \quad (5)$$

Для пятого уровня при фиксированном y_5 :

$$P(x) = Z_{50} \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)} + Z_{51} \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} +$$

$$Z_{52} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + Z_{53} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} +$$

$$Z_{54} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)} \quad (6)$$

Результаты интерполирования функции двух переменных $Z=f(x,y)$ по одной переменной – x показаны в т таблице 3.

режимы технологического процесса виброплазменного упрочнения [18, 19].

В связи с изложенным разработана методика теоретических исследований упрочняющих технологий, на основании которой получены аналитические зависимости износостойкости покрытий и режимов упрочнения. Полином вида $Z=P(x,y)$ в трехмерном пространстве (рис. 3) задает поверхность, которая в явном виде показывает зависимость величины износа от изменения напряжения и силы тока. Исследование поверхностей проводится с использованием функции нескольких переменных методом дифференциальных исчислений.

Для этого при фиксированном значении одного из параметров проводится плоскость ϕ_i (рис. 3). В результате пересечения поверхности $Z=P(x,y)$ с секущей плоскостью ϕ_i образуется кривая вида $Z=f(y)$. Используя методы дифференциального исчисления, определяется минимальное (min) значение функции $Z=f(y)$ в области изменения параметра u (сила тока). Допустим, что y_i есть min этой функции. Следовательно, в точке с координатами x_i, y_i кривая $Z=f(y)$, лежащая на поверхности и $Z=P(x,y)$, достигает своего минимального значения. На исследуемой поверхности при ее рассечении точка минимального износа будет иметь координаты x_i, y_i, z_i . Изменив x_i в заданных пределах, можно определить min других показателей на исследуемой поверхности. В следствии этого каждому значению x_i, y_i на поверхности $Z=P(x,y)$ будет соответствовать своя точка минимального значения Z_i .

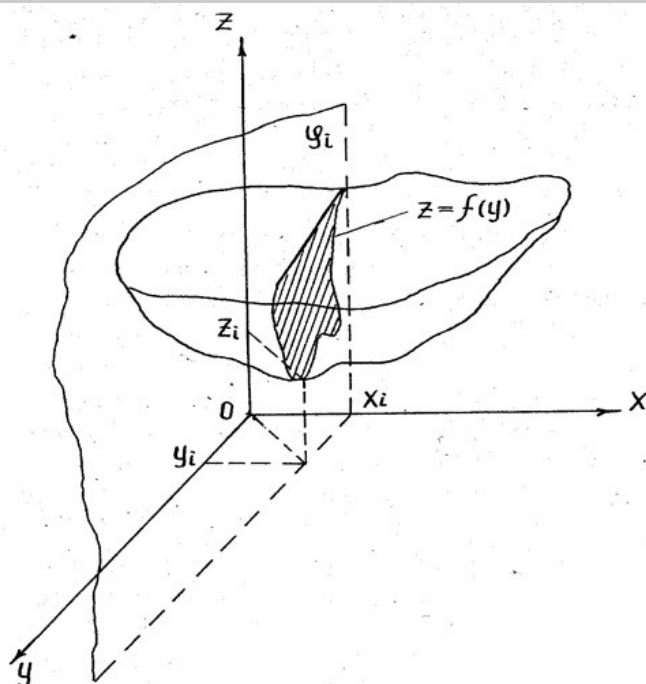


Рис. 3 – Зависимость исследуемого показателя износа от силы тока и напряжения:
 Z – исследуемый показатель износа; X – показатель напряжения; Y – показатель силы тока

Последовательно проводя рассечение исследуемой поверхности по указанной методике на поверхности $Z=P(x;y)$, можно получить систему точек $\{Z_i\}$, соединение которых образует на поверхности кривую $Z=P(x;y)$ при \min исследуемого технологического фактора. Ортогонально спроектировав эту кривую на плоскость, можно получить графическую зависимость силы тока K от напряжения φ .

Изложенному методу можно дать аналитическую интерпретацию и на ее основании получить уравнение, характеризующее технологический процесс упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Для этого проведем аналитическое определение зависимости между силой тока K и напряжением φ , при которой исследуемые параметры величины износа достигают своего минимального значения.

Обобщенное уравнение поверхности будет иметь следующий вид:

$$P = (x; y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x^i y^j \quad (8)$$

Выполнив условие $x=x_0$ получим:

$$P = (x; y) \Big|_{x=x_0} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x_0^i y^j \quad (9)$$

В результате преобразования уравнения (9), получится выражение:

$$Z = f(y) = \sum_{j=1}^m b_j y^j, \quad (10)$$

где $b_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} x_0^i$

Зависимость (10) описывает кривую $Z=f(y)$ (рис. 3).

Продифференцировав функцию (10) по y можно получить уравнение вида:

$$Z = f'(y) = \sum_{j=1}^m j b_j y^{j-1} \quad (11)$$

Если выполнить рассечение исследуемой поверхности (рис. 3) многократно, можно получить ряд кривых в местах пересечения секущей плоскости и исследуемой поверхности. Проведя исследование этих кривых по экстремальным (минимальным) точкам, можно определить зависимость, которая характеризует взаимосвязь входных факторов сила тока K и напряжения φ при условии минимального значения исследуемого параметра Z величина износа.

Функция задания исследуемой поверхности имеет следующий вид:

$$Z = P(x; y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x^i y^j \quad (12)$$

приняв $x=x_0$, получим следующую зависимость:

$$Z = P(x; y) \Big|_{x=x_0} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} x_0^i \right) y^j = f(y) \quad (13)$$

Продифференцировав зависимость (13), можно получить следующее выражение:

$$Z = f'(y) = \frac{\partial P(x; y)}{\partial y} \Big|_{x=x_0} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} x_0^i \right) j y^{j-1} = 0 \quad (14)$$

Если y_0 есть решение уравнения $f'(y) = 0$ то выражение

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij} x_0^i y_0^{j-1} = 0 \quad (15)$$

обращается в тождество, следовательно

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij} x^i j y^{j-1} = 0 \quad (16)$$

Уравнение (16) задает в неявном виде зависимость стационарных точек от x . Поскольку не все стационарные точки в секущей кривой находятся в своем минимальном значении при решении этого уравнения необходимо выдерживать следующее условие:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij} x^i j(j-1) y^{j-2} > 0 \quad (17)$$

Таким образом, разработана методика теоретических и экспериментальных исследований виброплазменной технологии упрочнения рабочих органов СХМ.

Выводы. Самая большая износостойкость отмечена у образца, обработанного

вибродуговым упрочнением с последующим электроискровым легированием после нанесения пасты, содержащей 80% ПГ-10Н-01 и 20% В4С. Она была выше, чем у контрольного образца, в 3 раза. Это объясняется двойным упрочнением и наличием большого количества легирующих элементов. Глубина упрочненного слоя поверхности при этом составляет порядка 0,3 мм.

В результате математического моделирования режимов упрочнения и показателей износа лабораторных образцов были получены уравнения поверхности, исследование которых позволяет рекомендовать рациональные режимы технологического процесса виброплазменного упрочнения.

Разработана методика рассеечения исследуемой поверхности, которая позволяет получить ряд кривых в местах пересечения секущей плоскости и исследуемой поверхности, представленной в графическом виде. Проведенное исследование секущих кривых по экстремальным (минимальным) точкам, позволило определить зависимость, характеризующую влияние входных факторов сила тока (Y) и напряжение (X) при минимальном значении величины износа (Z).

Литература

1. Превентивная стратегия технического обслуживания дробильного оборудования / И. Х. Гималтдинов, Б. Г. Зиганшин, И. Г. Галиев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. № 3(59). С. 71-76.
2. Низкотемпературный способ получения материалов из отходов теплоэнергетических и нефтехимических предприятий / Р. Р. Ахметзянов, И. Г. Хабибуллин, Х. С. Фасхутдинов и др. // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. 2009. № 4(35). С. 34-36.
3. Theoretical investigation of increasing efficiency of combine harvester operation on slopes / A. Belinsky, B. Ziganshin, A. Valiev, et al. // Engineering for Rural Development. Jelgava, 2019. P. 206-213. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N252.
4. Ensuring possibility of functioning of tractors in agricultural production taking into account residual resources of their units and systems / I. Galiev, C. Khafizov, R. Khusainov, et al. // Engineering for Rural Development. Jelgava, 2020. P. 48-53.
5. Химические аспекты трансформации серы в почве / Х. В. Гибадуллина, И. Г. Хабибуллин, З. М. Халиуллина и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2009. Т. 4. № 3(13). С. 97-99.
6. Методика расчета и проектирование дозатора-распределителя почвы / И. Х. Гайфуллин, Д. Т. Халиуллин, М. Н. Калимуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 18, № 1(69). – С. 45-51.
7. Кашфуллин А. М., Гурьянов С. Г., Пепеляева Е. В. Влияние технологических параметров дуговой наплавки на износостойкость покрытий // Пермский аграрный вестник. 2020. № 1(29). С. 19-27.
8. Пепеляева Е. В., Кашфуллин А. М., Гурьянов С. Г. Влияние способов обработки поверхности узлов трения, восстановленных с использованием газопламенного напыления, на их трибологические свойства // Пермский аграрный вестник. 2019. № 4(28). С. 11-17.
9. Theoretical investigation of increasing efficiency of combine harvester operation on slopes / A. Belinsky, B. Ziganshin, A. Valiev, et al. // Engineering for Rural Development. Jelgava, 2019. P. 206-213. doi: 10.22616/ERDev2019.18. N252.
10. Галиев И. Г., Хафизов К. А., Халиуллин Ф. Х. Модернизация системы смазки подшипникового узла турбокомпрессора автотракторного двигателя // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 1(52). С. 71-76.
11. Исследование помпажа путем совершенствования конструкции стенда для испытания сельскохозяйственных турбокомпрессоров / Т. И. Исинтаев, Б. К. Калиев, А. М. Плаксин и др. // АПК России. 2020. Т. 27. № 4. С. 642-648.
12. Совершенствование методик виброакустического контроля газораспределительного механизма ДВС / А. В. Гриценко, Н. Машрабов, С. А. Барышников и др. // АПК России. 2019. Т. 26. № 2. С. 193-202.
13. Павлов А. П., Сайфуллин Р. Н., Рафиков И. А. Обоснование режимов электроконтактной приварки стальных сеток при восстановлении деталей машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2016. № 1(37). С. 88-93.
14. Исследование остаточных напряжений в упрочненных и восстановленных деталях / А. Ф. Фаюршин, Р. Р. Хакимов, И. И. Багаутдинова и др. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 1. С. 39-44.
15. Формирование структуры и износостойкость наплавленных покрытий с боридным упрочнением / А. М. Кашфуллин, Е. В. Пепеляева, С. Г. Гурьянов и др. // Пермский аграрный вестник. 2019. № 2(26). С. 15-23.

16. Исследования толщины электроискровых покрытий в зависимости от количества нанесенных слоев и скажности тока / А. А. Гайнетдинов, Р. Н. Сайфуллин, А. Ф. Фаюршин и др. // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2022. № 1(61). С. 103-109.

17. Повышение производительности и качества восстановления деталей электролитическим натиранием / Н. Р. Адигамов, А. Р. Валиев, И. Х. Гималтдинов и др. // Техника и оборудование для села. 2020. № 4 (274). С. 34-38.

18. Патент № 2718017 С1 Российская Федерация, МПК В23Н 5/00, В23Н 9/00, В23К 9/04. Комбинированный способ упрочнения металлических поверхностей деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания : № 2019127085 : заявл. 27.08.2019 : опубл. 30.03.2020 / Н. Р. Адигамов, С. Н. Шарифуллин, Р. Р. Шайхутдинов и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ).

19. Исследование влияния параметров рабочих органов и режимов работы культиватора модульного типа на качество поверхностной обработки почвы / О. В. Лисунов, М. В. Богиня, А. А. Васильев, Е. Н. Олейникова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1(61). – С. 190-196.

Сведения об авторах:

Адигамов Наиль Рашатович – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: n-adigamov@rambler.ru

Гималтдинов Ильдус Хафизович – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: tskszgau@mail.ru

Галиев Ильгиз Гакифович – доктор технических наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: drgali@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Гриценко Александр Владимирович – доктор технических наук, доцент кафедры технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности, e-mail: alexgrits13@mail.ru

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

Казаков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: ura.kazakov@mail.ru

Чувашский государственный аграрный университет, г Чебоксары, Россия

PROCESSING THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE USE OF TECHNOLOGIES OF INTEGRATED MICROPLASMA HARDENING OF WORKING UNITS AND PARTS OF AGRICULTURAL MACHINES N. R. Adigamov, I. Kh. Gimaltidinov, I. G. Galiev, A. V. Gritsenko, Yu. F. Kazakov

Abstract. Today, the problem of maintaining the efficiency of complex modern domestic and foreign agricultural machines is quite acute. The working units of agricultural tillage machines operate in an aggressive abrasive environment, which leads to their intensive wear and, as a result, to the loss of geometric shape. This, in turn, leads to a violation of agrotechnical requirements, which significantly affects the yield of cultivated crops. Serial working units of soil-cultivating machines are made of alloy steels of the ST65G type with a working hardness of HRC 55 ... 60. The purpose of the research is to increase the wear resistance of the working bodies of tillage agricultural machines by using the technology of complex microplasma hardening, with the development of a methodology for determining rational modes of processing working surfaces. To evaluate the effectiveness of complex hardening of laboratory samples, studies of the elemental composition of the hardened layer were carried out. Plates made of ST65G steel were used as laboratory samples. Hardening was carried out using various combinations of cermet powders and microplasma hardening modes. Determination of wear resistance was carried out on a friction machine 77 MT-1. The best results were noted after vibro-arc hardening followed by electrospark alloying and the use of a cermet powder consisting of 80% PG-10N-01 matrix powder and 20% B4C boron carbide. Based on the indicators of hardening regimes, Lagrange interpolation polynomials were constructed, which describe the dependence of the amount of sample wear on the current and voltage, an algorithm was developed for determining rational hardening regimes to achieve maximum wear resistance of the studied samples. The microhardness of the surface of products during electrospark hardening increased up to 2 times, and with vibroarc in combination with electrospark alloying and the use of special pastes with cermet powders - more than 3 times. The depth of the hardened surface layer with complex hardening is about 0.3 mm.

Key words: hardening, wear resistance, laboratory samples, hardness, models, Lagrange polynomials, processing modes.

References

1. Gimaltidinov IKh, Ziganshin BG, Galiev IG. [Preventive strategy for the maintenance of crushing equipment]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.15. 3(59). 71-76 p.
2. Akhmetzyanov RR, Khabibullin IG, Faskhutdinov KhS. [Low-temperature method for obtaining materials from waste products of thermal power and petrochemical enterprises]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta imeni V.P. Goryachkina. 2009; 4(35). 34-36 p.
3. Belinsky A, Ziganshin B, Valiev A. Theoretical investigation of increasing efficiency of combine harvester operation on slopes. Engineering for Rural Development. Jelgava. 2019; 206-213 p. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N252.
4. Galiev I, Khafizov C, Khusainov R. Ensuring possibility of functioning of tractors in agricultural production taking into account residual resources of their units and systems. Engineering for Rural Development. Jelgava. 2020; 48-53 p.
5. Gibadullina KhV, Khabibullin IG, Khaliullina ZM. [Chemical aspects of sulfur transformation in soil]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2009; Vol.4. 3(13). 97-99 p.
6. Gayfullin IH, Khaliullin DT, Kalimullin MN, Ziganshin BG, Hamitov RR. [Methodology of calculation and design of the dispenser-distributor of soil]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol. 18. 1(69). 45-51 p.
7. Kashfullin AM, Gur'yanov SG, Pepelyaeva EV. [Influence of technological parameters of arc surfacing on the wear resistance of coatings]. Permskiy agrarnyi vestnik. 2020; 1(29). 19-27 p.
8. Pepelyaeva EV, Kashfullin AM, Gur'yanov SG. [Influence of methods of surface treatment of friction units restored using flame spraying on their tribological properties]. Permskiy agrarnyi vestnik. 2019; 4(28). 11-17 p.

9. Belinsky A, Ziganshin B, Valiev A. Theoretical investigation of increasing efficiency of combine harvester operation on slopes. *Engineering for Rural Development*. Jelgava. 2019; 206-213 p. doi: 10.22616/ERDev2019.18. N252.
10. Galiev IG, Khafizov KA, Khaliullin FK. [Modernization of the lubrication system for the bearing unit of the turbocharger of an autotractor engine]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019; Vol.14. 1 (52). 71-76 p.
11. Isintaev TI, Kaliev BK, Plaksin AM. [Research on surge by improving the design of a stand for testing agricultural turbocompressors]. *APK Rossii*. 2020; Vol.27. 4. 642-648 p.
12. Gritsenko AV, Mashrabov N, Baryshnikov SA. [Improving the methods of vibroacoustic control of the gas distribution mechanism of internal combustion engines]. *APK Rossii*. 2019; Vol.26. 2. 193-202 p.
13. Pavlov AP, Sayfullin RN, Rafikov IA. [Substantiation of modes of electrocontact welding of steel meshes when restoring machine parts]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; 1(37). 88-93 p.
14. Fayurshin AF, Khakimov RR, Bagautdinova II. [Study of residual stresses in hardened and restored parts]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2016; 1. 39-44 p.
15. Kashfullin AM, Pepelyaeva EV, Guryanov SG. [Formation of the structure and wear resistance of deposited coatings with boride hardening]. *Permskiy agrarniy vestnik*. 2019; 2(26). 15-23 p.
16. Gaynetdinov AA, Sayfullin RN, Fayurshin AF. [Investigation of the thickness of electrospark coatings depending on the number of deposited layers and current duty cycle]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; 1(61). 103-109 p.
17. Adigamov NR, Valiev AR, Gimaltdinov IKh. [Improving the productivity and quality of restoring parts by electrolytic rubbing]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020; 4(274). 34-38 p.
18. Adigamov NR, Sharifullin SN, Shaykhutdinov RR. Patent No. 2718017 C1 Russian Federation, IPC B23H 5/00, B23H 9/00, B23K 9/04. [Combined method for hardening metal surfaces of machine parts operating under abrasive wear conditions]. No. 2019127085: Appl. 08/27/2019. publ. 30.03.2020; applicant Kazan State Agrarian University.
19. Lisunov OV, Boginya MV, Vasiliev AA, Oleinikova EN. [Investigation of the influence of parameters of working bodies and modes of operation of a modular cultivator on the quality of surface tillage]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaistvennoy akademii*. 2023; 1(61). 190-196 p.

Authors:

Adigamov Nail Rashatovich - Doctor of Technical sciences, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: n-adigamov@rambler.ru
 Gimaltdinov Ildus Khafizovich – Ph.D. of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: tskszgau@mail.ru
 Galiev Ilgiz Gakifovich - Doctor of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: drgali@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
 Gritsenko Aleksandr Vladimirovich - Doctor of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service of Machines, Equipment and Life Safety, e-mail: alexgrits13@mail.ru
 South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia
 Kazakov Yuriy Fedorovich - Doctor of Technical sciences, Professor of department of transport technological machines and complexes, e-mail: ura.kazakov@mail.ru
 Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia.