

УДК 621.81

UDS 621.81

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ  
НА РЕЖУЩИЕ НОЖИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ**

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF WEAR-  
RESISTANT COATINGS ON CUTTING  
BLADES UNIVERSAL GRINDERS**

Горохова Марина Николаевна  
к.т.н., доцент

Gorokhova Marina Nikolayevna  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor

Коновалов Владимир Васильевич  
ст. преподаватель

Konovarov Vladimir Vasilyevich  
Senior Teacher

Абрамов Юрий Николаевич  
ст. преподаватель

Abramov George Nikolayevich  
Senior Teacher

Бышов Дмитрий Николаевич  
к.т.н., ст. преподаватель

Byshov Dmitry Nikolayevich  
Cand.Tech.Sci., Senior Teacher

Горохов Александр Анатольевич  
студент

Gorokhov Alexander Anatolyevich  
student

*Рязанский государственный агротехнологический  
университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия*

*Ryazan State Agrotechnological University named  
after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

В статье установлено, что в рыночных условиях экономического спада ремонтного производства традиционные технологические решения, ориентированные на массовый и крупносерийный тип, утратили практическую значимость. Повышение эффективности нанесения износостойких покрытий электроимпульсным способом основано на использовании технологических возможностей способа и принципах технической самодостаточности малых ремонтных предприятий. Для чего разработан комбинированный способ обработки, заменяющий применение традиционного технологического оборудования, с получением качества сопоставимого существующим технологиям

In the article, it is established that in the market conditions of economic recession of repair production, the traditional technological decisions focused on mass and business lot type, have lost the practical importance. Increase of the efficiency of drawing of wearproof coverings with the electropulse way is based on the use of technological possibilities of the way and the principles of technical self-sufficiency of small repair shops. For that, the combined way of processing, replacing use of the traditional technological equipment, with obtaining quality comparable to the existing technologies has been developed

Ключевые слова: НАНЕСЕНИЕ, ПОКРЫТИЕ,  
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ,  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ

Keywords: DRAWING, COVERING, CHEMICAL  
COMPOSITION, ELECTROPULSE WAY

В настоящее время при подготовке техники к новому сельскохозяйственному сезону ежегодно подвергается ремонту 58% тракторов, 75% зерноуборочных комбайнов и 50% автомобильного парка. Однако, до 20% машинно-тракторного парка не участвует в проведении работ из-за технических неисправностей.

Одним из основных резервов повышения эффективности использования техники, экономии материальных, топливно-энергетических и трудо-

вых ресурсов является нанесение металлопокрытий при изготовлении новых и восстановлении изношенных режущих ножей. Экономическая целесообразность восстановления обусловлена возможностью повторного и неоднократного использования 65...75 % изношенных деталей. Себестоимость восстановления не превышает 10...30 % стоимости новых деталей, а расход материалов в 15...20 раз ниже, чем на их изготовление [1].

Перспективным в этом направлении является нанесение износостойких покрытий с низкотемпературным воздействием на материал основы при использовании малогабаритного и простого в обслуживании технологического оборудования электроимпульсным способом. Применение присадочных ферромагнитных порошков позволяет направленно формировать требуемую структуру покрытий и управлять процессом получения заданных физико-механических свойств.

Однако, в рыночных условиях экономического спада ремонтного производства традиционные технологические решения, ориентированные на массовый и крупносерийный тип производства, утратили практическую значимость. Реформирование экономики невозможно без развития и совершенствования различных форм хозяйствования, одна из которых – малые экономические структуры, которые рассматриваются в качестве символа производственной мобильности, рыночной гибкости и инновационной восприимчивости [2]. Углубление специализации в научных разработках привело к тому, что во многих случаях малые предприятия работают в неперспективных отраслях и довольно успешно конкурируют на рынках с крупными предприятиями. Массовый выпуск сельскохозяйственной техники вызывает потребность в промышленных услугах по ее ремонту и обслуживанию, которые часто осуществляют малые ремонтные предприятия, так как монополии вынуждены создавать разветвленную сеть филиалов.

Кроме того, существующие технологии требуют исследования исходных параметров изношенных деталей, такие как технологическая наслед-

ственность, полученная после предыдущей эксплуатации, и химический состав материала, что является трудновыполнимой задачей в условиях малых ремонтных предприятий. Особенно остро стоит вопрос ремонта импортной техники, когда необходимо восстанавливать детали с неопределенным химическим составом.

Существенный вклад в развитие теоретических основ по нанесению износостойких покрытий внесли ученые: В. И. Черноиванов, В.П. Лялякин, А.В. Поляченко, Р.А. Латыпов, Е.А. Пучин, Е.Г. Коновалов, Д.Г. Вадивасов, Клименко, Ф.Х. Бурумкулов, Н.Н. Литовченко, В.М. Аскинази, И.Е. Ульман, И.И. Луневский И.Р., Пацкевич, Ю.Н. Петров, Н.И. Доценко, Н.Н. Дорожкин, В.В. Жуков, В.И. Казарцев, В.М. Кряжков, Б.Р. Левицкий, Л.Г. Лившиц, Н.Н. Маслов, И.И. Фрулин, В.А. Щадричев, Е.Л. Воловик, В.А. Наливкин, М.М. Северный, А.И. Селиванов, М.Н. Ивлиев В.М., Фархшатов, М.З. Нафиков, В.А. Горохов и многие другие.

В результате анализа работ этих авторов установлено, что нанесенные износостойкие покрытия требуют последующей механической обработки при использовании дорогостоящих инструментов и дополнительного технологического оборудования. Кроме того поиск соотношений, определяющих количественные связи параметров качества с основными технологическими параметрами, традиционно связан с установлением технологической наследственности, полученной после предыдущей эксплуатации, и химического состава материала детали. Особенно остро стоит вопрос нанесения металлопокрытий на детали импортной техники с неопределенным химическим составом. Кроме того, установлено, что в процессе намагничивания присадочного материала имеют место случаи, когда ферромагнитный порошок концентрируется в определенных местах с образованием индикаторных рисунков [3]. Данное обстоятельство позволило направить наши исследования на расширение возможностей электроимпульсного способа путем обнаружения внутренних усталостных трещин.

Однако, согласно ГОСТ 21105-87, обнаружение внутренних дефектов возможно, если коэрцитивная сила материала детали более 10А/см. Однако, существует большое количество конструкционных сталей, из которых изготовлены ответственные детали машин, с коэрцитивной силой менее 10А/см, которые также необходимо проверять на наличие внутренних дефектов.

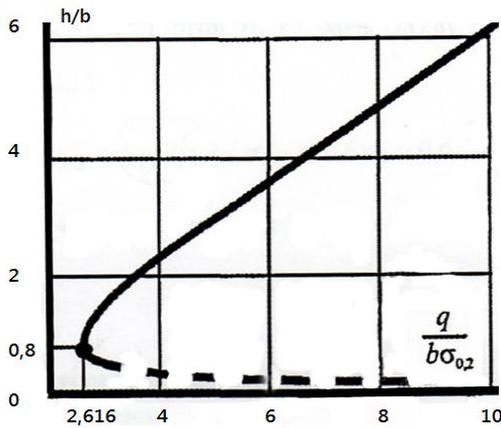
Также существуют конструкционные стали с большой коэрцитивной силой, которые возможно проверять только способом приложенного поля, что приводит к обнаружению мнимых дефектов. Кроме того, напряженность магнитного поля по этому стандарту определяется только по значению коэрцитивной силы. Однако существуют материалы конструкционных сталей с одинаковым значением коэрцитивной силы, но разным значением магнитной индукции. Кроме того, электроимпульсный способ совместно с источником сварочного тока создают мощную и динамично меняющуюся нагрузку на сельскохозяйственные сети. Даже при небольших токах наплавки до 200А потребляемая мощность составляет 12кВА. Анализ парка сварочного оборудования применяемого в условиях малых ремонтных предприятий показал, что в большинстве своем используются однофазные источники сварочного тока, для которых режим короткого замыкания при нестабильности сельскохозяйственных сетей является аварийным. А применение трехфазных источников тока предполагает наличие трехфазных питающих сетей.

Одним из основных резервов повышения эффективности нанесения износостойких покрытий электроимпульсным способом является использование технологического тепла, выделяемого при наплавке, для интенсификации совместной отделочно-упрочняющей обработки. Распространение тепла при электроимпульсном способе мощным и быстро движущимся сосредоточенным источником, перемещающимся на поверхности по винтовой линии, можно представить как результат суммарного воздействия

кольцевых мгновенных источников в сочетании с процессом выравнивания температур, что соответствует известному способу совместной обработки конструкционных сталей резанием и поверхностным пластическим деформированием, включающий нагрев обрабатываемой поверхности ацетиленкислородной горелкой. Преимущество комбинированного способа обработки заключается в исключении дополнительного источника нагрева за счет использования технологического тепла, выделяемого при наплавке [4].

Глубина упрочненного слоя  $h$  является основным результатом комбинированного способа обработки. Существует оптимальное значение  $h$ , при котором предел выносливости деталей имеет наибольшее значение. При восстановлении и упрочнении деталей необходимо располагать возможностью расчетного прогнозирования глубины упрочненного слоя. Решение этой задачи основано на теории напряженного состояния упрочняемой поверхности, согласно которой на глубине больше  $h$  сохраняется напряженное состояние, соответствующее чисто упругой деформации; на глубине меньшей  $h$  имеет место пластическая деформация. На глубине равной  $h$  значение эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  соответствует пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  упрочняемого материала:  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_{0,2}$ .

Выражая наибольшее давление  $\rho_0$  в точках продольной оси симметрии площадки контакта как:  $\rho_0 = \frac{2q}{r \cdot b}$ , где  $q$  – удельная рабочая нагрузка, Н/мм;  $\pi=3,14$ ,  $b$  – полуширина остаточного отпечатка от цилиндрического ролика, мм, получим (1):



$$\frac{q}{b \cdot S_{0.2}} = 0,25p \cdot \left[ \frac{h}{b} - \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2}} \right]^{-1} \quad (1)$$

По формуле (1) строим график зависимости относительной глубины упрочненного слоя  $h/b$  от относительного

Рисунок 1. - График зависимости относительной глубины упрочненного слоя от относительного коэффициента

коэффициента  $\kappa = \frac{q}{b \cdot S_{0.2}}$  (рис. 1). Каждому значению относительного коэффициента

соответствует два значения относительной глубины упроч-

ненного слоя  $h/b$ . Известно, что при первоначально линейном контакте пластическая деформация впервые возникает на глубине равной  $h=0,8b$ . Таким образом, относительная глубина упрочненного слоя не может быть меньше 0,8, поэтому при практическом использовании построенного графика исследуем только его верхнюю часть. Значение  $h/b = 0,8$  отвечает ординате точки перегиба графика. В момент появления пластической деформации на глубине  $h=0,8b$  величина эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{эКВ}}$  в этой точке соответствует (2):

$$\sigma_{\text{эКВ}} = 0,6\rho_0 = 0,6 \frac{2q}{pb} \quad (2)$$

Таким образом, абсцисса точки перегиба графика соответствует:

$$\frac{q}{b \cdot S_{0.2}} = 2,616 [5].$$

В общем случае верхнюю часть графика можно аппроксимировать уравнением (3):

$$\frac{h}{b} = 1,118 \cdot \left( \frac{q}{b S_{0.2}} - 2,616 \right)^{0,779} + 0,8 \quad (3)$$

При комбинированном способе обработки возникает остаточный отпечаток от цилиндрического ролика. Пластическая деформация в точках продольной оси симметрии площадки контакта впервые появляется, когда эквивалентные напряжения в этих точках достигают предела текучести  $\sigma_{0,2}$ :

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_{0,2} = \rho_0 \cdot (1 - 2\mu)$$

где  $\mu = 0,3$  - коэффициент Пуассона.

Таким образом: 
$$\frac{q}{b \cdot s_{0,2}} = 3,925.$$

Практическая реализация верхней части графика происходит при значениях  $\frac{q}{b \cdot s_{0,2}} \geq 3,925$ . С учетом этого условия график может быть

описан линейной зависимостью (4): 
$$\frac{h}{b} = 0,664 \cdot \frac{q}{b \cdot s_{0,2}} - 0,385 \rightarrow h = 0,664 \frac{q}{s_{0,2}} - 0,385b$$
 (4)

Полуширина  $b$  остаточного отпечатка определяется по формуле (5):

$$b = 2 \sqrt{q \cdot R(k_1 + k_2)}$$
 (5)

С учетом зависимости (5), формула (4) примет вид (6):

$$h = 0,664 \cdot \frac{q}{s_{0,2}} - 0,77 \sqrt{q \cdot R(k_1 + k_2)}$$
 (6)

для конструкционных сталей  $k_1 = k_2 = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$ .

Таким образом: 
$$h = 0,664 \frac{q}{s_{0,2}} - 0,0013 \sqrt{q \cdot R}$$
 (7)

Предварительными экспериментальными исследованиями установлено, что реальная ширина остаточного отпечатка, возникающего при комбинированном способе обработки, отличается от рассчитанной теоретическим путем. Учитывая зависимости, определяющие ширину  $2b$  остаточного отпечатка при первоначально линейном упругопластическом контакте деталей при  $\sigma_{0,2} = (0,2...0,22) HV$  формула (7) примет вид (8):

$$h = 2,87 \cdot \frac{q}{HV} - 0,01R \quad (8)$$

Таким образом, на основе закономерностей теории упругости для случая внедрения цилиндрического ролика в поверхность детали получено простое решение задачи о расчетном прогнозировании глубины упрочненного слоя в зависимости от удельной рабочей нагрузки  $q$ , радиуса цилиндрического ролика  $R$  и физических свойств обрабатываемого материала, его пластической твердости  $HV$  (рис. 2,3) [6].

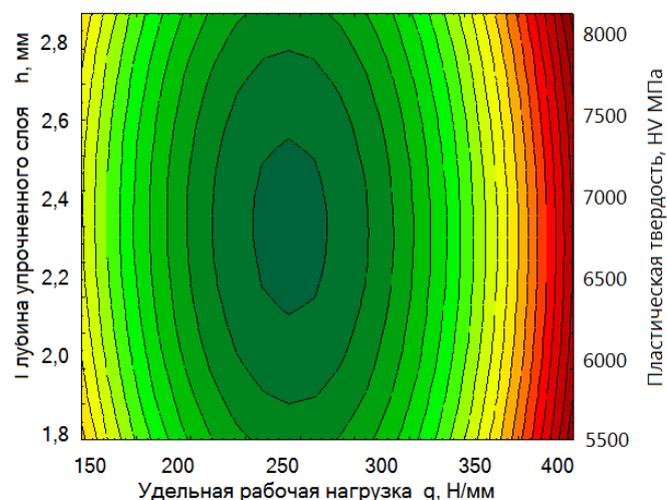
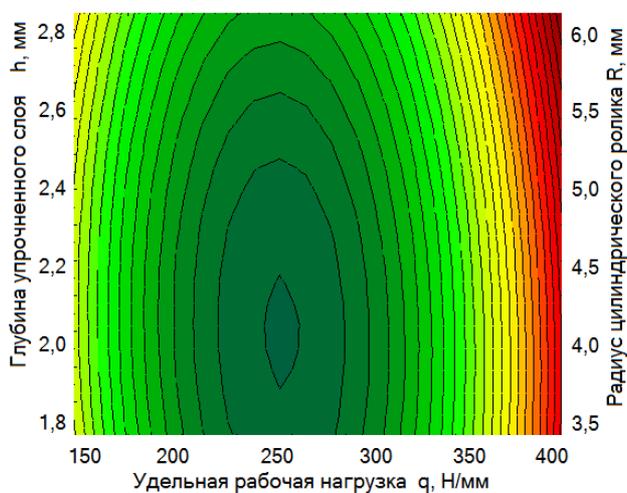


Рисунок 2. – Зависимость глубины упрочненного слоя  $h$ , мм от удельной рабочей нагрузки  $q$ , Н/мм и радиуса цилиндрического ролика  $R$

Рисунок 3. – Зависимость глубины упрочненного слоя  $h$ , мм от удельной рабочей нагрузки  $q$ , Н/мм и пластической твердости  $HV$ , МПа

В качестве косвенного параметра, учитывающего изменение физических свойств материала детали, принята удельная магнитная энергия  $W$ , которая является одной из основных характеристик, определяющей свойства ферромагнитного материала сохранять остаточную магнитную индукцию  $B_r$ :

$$W = \frac{H \cdot B_r}{2}, \text{ где } H - \text{ напряженность магнитного поля.}$$

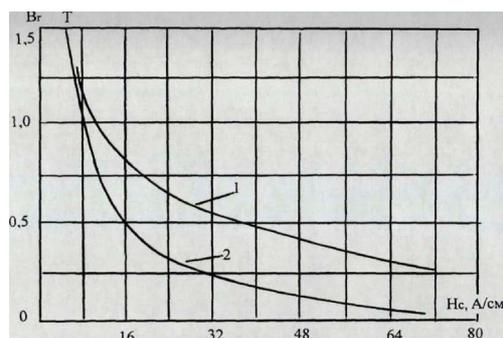


Рисунок 4. - Кривые выбора способа намагничивания: 1-кривая А по ГОСТ 21105-87; 2-кривая А равной удельной магнитной энергии

ставлены кривые выбора способа намагничивания: кривая 1, соответствующие ГОСТ 21105-87 и кривая 2, построенная по параметру равной удельной магнитной энергии. Параметр удельной магнитной энергии дает возможность: выбора оптимальных значений напряженности магнитного поля ниже предельного ее значения (напряженности магнитного насыщения) при одновременном уменьшении осаждения порошка по мнимому дефекту [5].

Параметр удельной магнитной энергии является общим показателем справедливым для любой марки конструкционных сталей: чем больше удельная магнитная энергия, тем больше развито магнитное поле в области дефекта и выше чувствительность обнаружения внутренних дефектов. Однако, при нанесении порошка на ферромагнитные детали, имеющие высокие значения удельной магнитной энергии, часто выявляются мнимые дефекты (осаждение порошка по рискам). Предварительными исследованиями установлено, что снижение удельной магнитной энергии до  $200 \text{ Дж/м}^3$  при работе на промежуточных петлях магнитного гистерезиса значительно уменьшает осаждение порошка по мнимым дефектам. При значении менее  $200 \text{ Дж/м}^3$  необходимо применять способ приложенного поля. Таким образом, параметр удельной магнитной энергии обуславливает проектные решения по разработке системы автоматического управления по определению оптимальных режимов намагничивания (рис. 5) [7].

На основе параметра удельной магнитной энергии теоретически установлено, что кривые по определению способа намагничивания ферромагнитных порошков на поверхность детали с неопределенным химическим составом должны быть кривыми равной удельной магнитной энергии. На рисунке 4 пред-

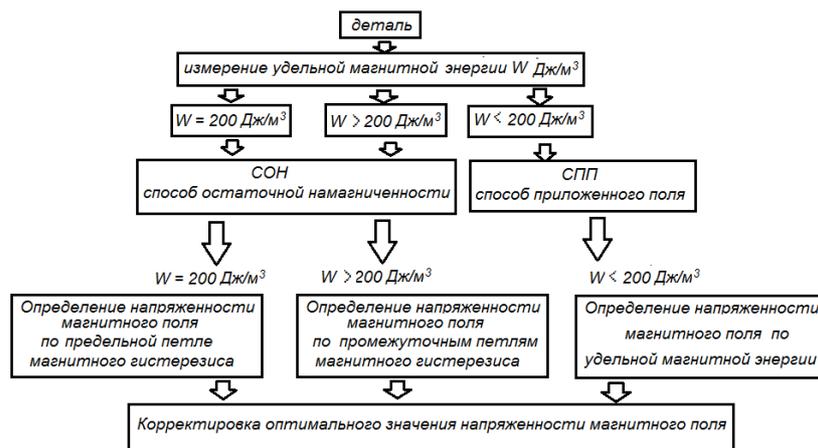


Рисунок 5. – Алгоритм системы автоматического управления по определению оптимального режима намагничивания по параметру удельной магнитной энергии  $W$

В результате экспериментальных исследований установлен характер изменения температуры в поверхностном слое восстанавливаемой детали. Температура детали на глубине 0,5 мм не превышает 320°C, на глубине 3,5 мм - 200°C и на глубине 6,5 мм - 140°C (рис. 6). Нагретое до разупрочненного состояния металлопокрытие позволяет использовать технологическое тепло, выделяемое при наплавке, для интенсификации отделочно-упрочняющей обработки путем совместной механической обработки резанием и поверхностного пластического деформирования с помощью комбинированных инструментов.

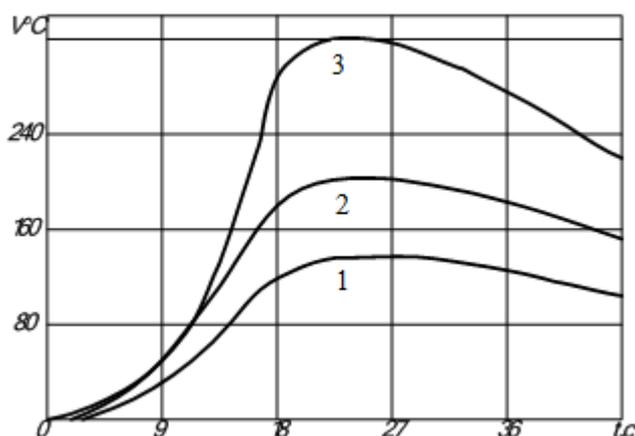


Рисунок 6. - Изменение температуры поверхностного слоя в зависимости от времени начала процесса на глубине; 1 – 6,5; 2 – 3,5; 3 – 0,5 мм

Деление способов отделочной и упрочняющей обработки на две группы: резание и поверхностное пластическое деформирование не является принципиальным, так как для обеих групп образование поверхности связано с пластическим деформированием слоя металла. Разница состоит только в

том, что при обработке резанием пластическое напряженное состояние локализуется у режущей кромки инструмента, что приводит к образованию стружки, а при поверхностном деформировании пластическое напряженное состояние создается в значительном объеме металла, обеспечивая его безотрывное течение. Кроме того, эти способы механической обработки поверхностей базируются на единых кинематических схемах и поэтому легко трансформируются один в другой.

Особенностью комбинированного способа обработки является то, что полюсный наконечник и комбинированный инструмент в форме скобы-двухполюсника имеют одинаковую скорость обработки (скорость продольной подачи и окружную скорость). Выбор независимых технологических параметров обусловлен тем, что они оказывают основное влияние на параметры процесса: удельная рабочая нагрузка  $q$ , Н/мм; напряженность магнитного поля  $H$ , А/м; рабочий зазор  $\Delta$ , мм; скорость продольной подачи  $S$ , мм/об; окружная скорость  $V$ , м/с. В качестве параметров оптимизации приняты: производительность процесса  $G$ ; глубина упрочненного слоя  $h$ , мм; шероховатость поверхности  $R_a$ . Уровни варьирования основных технологических параметров представлены в таблице 1. Обработку полученных данных производили с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0.

Таблица 1. – Уровни варьирования основных технологических параметров

Уровни	Технологические параметры				
	$q$ , Н/мм	$H$ , А/м	$\Delta$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/с
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
+ 2	250	140	0,6	0,30	0,10
+ 1	225	120	0,5	0,25	0,09
0	200	100	0,4	0,20	0,08
-1	175	80	0,3	0,15	0,07
-2	150	60	0,2	0,10	0,06

Математическая модель, определяющая зависимость производительности  $Y_1 = G$ ; шероховатости  $Y_2 = R_a$ ; глубины упрочненного слоя  $Y_3 = h$  от

основных технологических параметров  $q$ ,  $H$ ,  $\Delta$ ,  $S$ ,  $V$  в нормированном виде, соответственно,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  имеют следующий вид:

$$Y_1 = 0,22 - 0,007 \cdot X_1 + 0,011 \cdot X_2 + 0,010 \cdot X_3 + 0,026 \cdot X_4 - 0,02 \cdot X_5 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,045 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,018 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,055 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0,055 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,045 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0,05 \cdot X_3 \cdot X_5 - 0,06 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0,002 \cdot X_1^2 - 0,009 \cdot X_2^2 - 0,009 \cdot X_3^2 + 0,006 \cdot X_5^2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 4,64 - 0,49 \cdot X_1 - 0,74 \cdot X_2 - 0,77 \cdot X_3 + 0,62 \cdot X_4 + 0,84 \cdot X_5 - 0,663 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,613 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,688 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0,688 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,163 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,663 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0,363 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,463 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0,84 \cdot X_1^2 + 0,44 \cdot X_2^2 + 0,2 \cdot X_3^2 + 0,71 \cdot X_4^2 + 0,37 \cdot X_5^2 \quad (10)$$

$$Y_3 = 2,2 + 0,26 \cdot X_1 + 0,10 \cdot X_2 + 0,20 \cdot X_3 - 0,15 \cdot X_4 - 0,06 \cdot X_5 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,15 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,35 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,08 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0,18 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,75 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,15 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0,2 \cdot X_3 \cdot X_5 - 0,175 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0,39 \cdot X_1^2 - 0,13 \cdot X_2^2 - 0,14 \cdot X_3^2 - 0,12 \cdot X_4^2 - 0,11 \cdot X_5^2 \quad (11)$$

Установлено, что технологические параметры по-разному влияют на параметры оптимизации, зависимость носит экстремальный характер. Обусловлено это совместным действием электрической, магнитной, тепловой и механической энергий (рис. 7...10).

Удельная рабочая нагрузка  $q$  является основным параметром, расширяющим технологические возможности способа. При увеличении до  $q=250$  Н/мм происходит уменьшение шероховатости поверхности и увеличение глубины упрочненного слоя. Дальнейшее увеличение  $q$  почти не изменяет шероховатость поверхности и стабилизирует глубину упрочненного слоя. При  $q > 375$  Н/мм в поверхностном слое покрытия возникают напряжения, при которых образуются трещины. Таким образом, оптимальным является удельная рабочая нагрузка  $q$  при условии  $250 < q < 375$  Н/мм [1-7].

Напряженность магнитного поля  $H$  влияет на качество покрытия и на его толщину. При  $H < 60$  А/м порошок слабо удерживается на поверхности детали, и формируется пористое покрытие. С повышением напряженности магнитного поля толщина покрытия и глубина упрочненного слоя увеличиваются. При значениях  $H < 60$  А/м глубина упрочненного слоя уменьша-

ется, повышается шероховатость поверхности. Начиная с  $H > 140$  А/м, наблюдается нестабильность возникновения электрических разрядов и образование скоплений порошка по мнимым дефектам. Таким образом, наиболее интенсивно и с высоким качеством комбинированный способ обработки происходит при выполнении условия:  $90 < H < 125$  А/м.

Величина рабочего зазора  $\Delta < 0,3$  мм не дает возможности присадочному порошку, не участвовавшему в процессе, пройти рабочую зону, что вызывает короткое замыкание. Величина рабочего зазора  $\Delta > 0,5$  мм, увеличивает длину цепочек из намагниченного порошка, что снижает их жесткость, повышает пористость покрытия, снижает производительность процесса.

Влияние продольной подачи  $S$  и окружной скорости  $V$  на производительность процесса является основным из рассматриваемых технологических параметров. Установлено, чем больше величина продольной подачи  $S$  и окружная скорость  $V$ , тем выше производительность процесса. Изменение продольной подачи в пределах  $0,06 \dots 0,25$  мм/об оказывает незначительное влияние на качество покрытия. Однако, увеличение подачи более  $0,35$  мм/об вызывает увеличение шероховатости поверхности. Оптимальными являются продольная подача  $S$  и окружная скорость  $V$ , при которых удовлетворяются условия:  $0,2 < S < 0,3$  мм/об и  $0,07 < V < 0,09$  м/с.

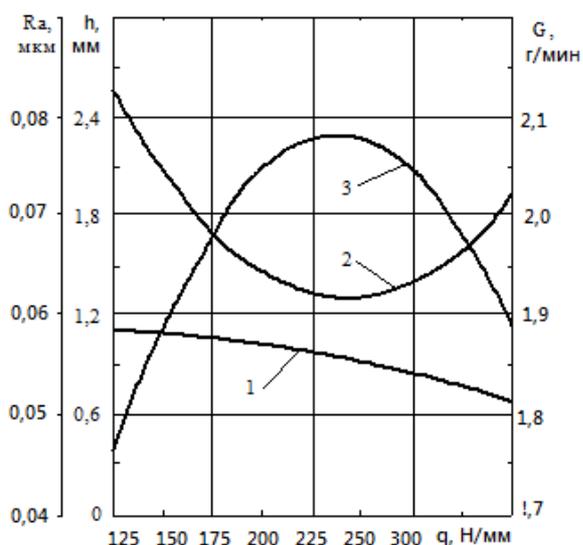


Рисунок 7.-Зависимость производительности G (1), шероховатости Ra (2) и глубины упрочненного слоя  $\epsilon$  (3) от удельной рабочей нагрузки q

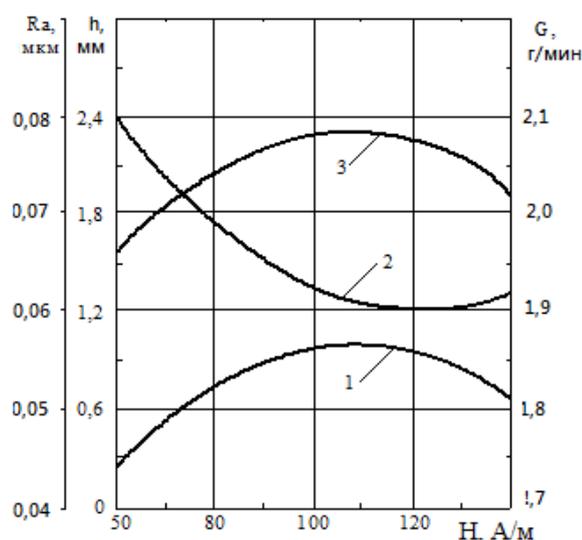


Рисунок 8. - Зависимость производительности G (1), шероховатости Ra (2) и глубины упрочненного слоя  $\epsilon$  (3) от напряженности магнитного поля H

С учетом уровня значимости основные технологические параметры расположены в порядке убывания влияния на параметры оптимизации в следующем порядке (табл. 2).

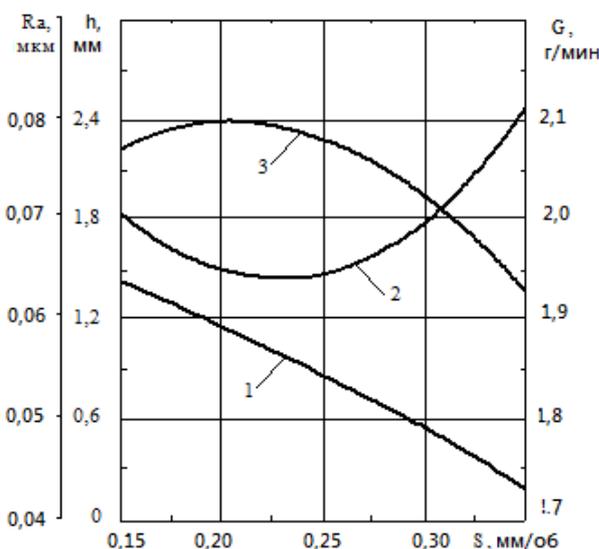


Рисунок 9. -Зависимость производительности G (1), шероховатости Ra (2) и глубины упрочненного слоя h (3) от продольной подачи S

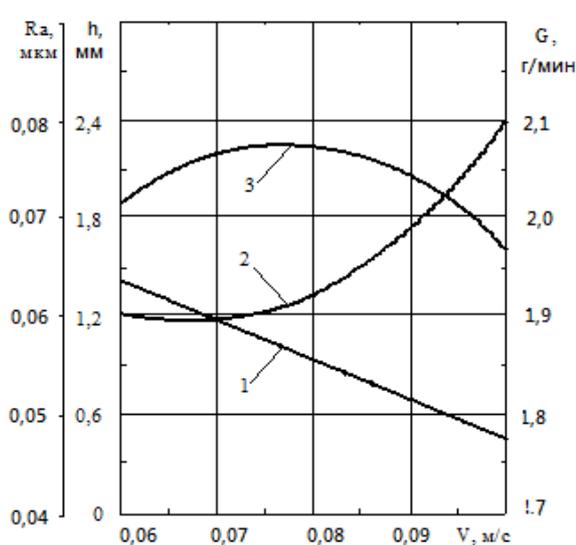


Рисунок 10. - Зависимость производительности G (1), шероховатости Ra (2) и глубины упрочненного слоя h (3) от окружной скорости V

Наибольшее влияние на производительность процесса оказывают скорость продольной подачи S и окружная скорость детали V потому, что помимо тепловых процессов при формировании рельефа поверхности осо-

бую роль играют формообразующие движения. Замыкает ряд удельная рабочая нагрузка  $q$ , которая почти не имеет непосредственного отношения к процессу наплавки. Производительность комбинированного способа обработки достигает 2,1 г/мин, что соответствует электроконтактной приварке присадочных порошков [1 -7].

Таблица 2. – Степень влияния технологических параметров на параметры оптимизации

Основные технологические параметры	Степень влияния на параметры оптимизации, %		
	$Y_1 = G$	$Y_2 = R_a$	$Y_3 = h$
Удельная рабочая нагрузка, $q$	9, 46	14, 16	33, 77
Напряженность магнитного поля, $H$	14, 86	21, 39	12, 99
Рабочий зазор, $\Delta$	13, 51	22, 25	25, 97
Продольная подача, $S$	35, 14	17, 92	19, 48
Окружная скорость, $V$	27, 03	24, 28	7, 79

Наибольшее влияние на шероховатость поверхности  $R_a$  оказывают окружная скорость детали  $V$  и величина рабочего зазора  $\Delta$  потому, что помимо перекрытия площадок при поверхностном пластическом деформировании особую роль играет жесткость цепочек из намагниченного порошка. Шероховатость поверхности при комбинированном способе обработки достигает значений, полученных после операции полирования  $R_a=0,063...0,080$  мкм, и соответствует требованиям технической документации при изготовлении новых деталей.

На глубину упрочненного слоя наибольшее влияние оказывает удельная рабочая нагрузка  $q$ . Экспериментальные результаты исследования глубины упрочненного слоя (рис. 11) сопоставлены со значениями, вычисленными по формулам (9) и (10).

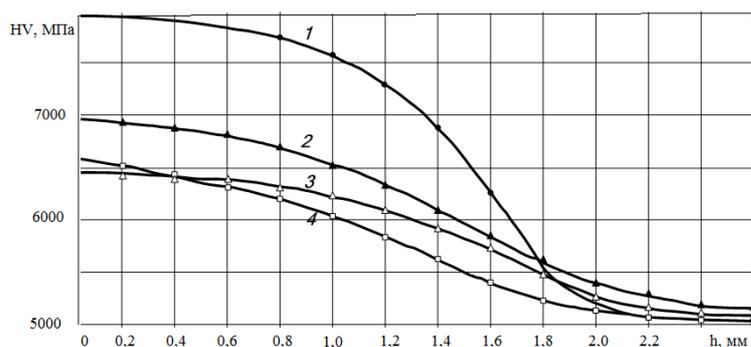


Рисунок 11. – Микротвердость по глубине упрочненного слоя: 1 – Б1; 2 – ФБХ-6-2 в аргоне; 3 - ФБХ-6-2; 4 - сормайт-1

Расчет по формуле (9), использующей значение ширины остаточного отпечатка, приводит к некоторому завышению расчетных значений  $h$ .

Это объясняется тем, что при  $\sigma_{0,2} = 0,21 \cdot HV$ ,

формула (9) принимает вид  $3,16 \cdot \frac{q}{D}$  и отличается от формулы (10) на 10%.

Разница вычисления  $h$  снижается с ростом пластической твердости упрочняемой поверхности. Незначительное влияние радиуса  $R$  цилиндрического ролика на величину  $h$  при комбинированном способе обработки деталей класса «вал» с радиусом  $R_v$  позволяет в разработанных формулах использовать приведенный радиус кривизны:

$$R_{пр} = \frac{R_g \cdot R}{(R_g + R)}$$

Разница рассчитанных по формуле (10) и экспериментальных значений  $h$  не превышает 4...6%. Таким образом, результаты экспериментальных исследований позволяют использовать полученную теоретическим путем формулу (10) для прогнозирования оптимальной глубины упрочненного слоя и назначать оптимальные режимы обработки.

Исходя из требований, предъявляемых к деталям в процессе эксплуатации, на основные технологические параметры наложены ограничения. Получен оптимальный режим:  $q = 250$  Н/мм;  $H = 100$  А/м;  $\Delta = 0,4$  мм;  $S = 0,25$  мм/об;  $V = 0,08$  м/с.

С целью проверки эффективности системы автоматического управления проведены сравнительные исследования, которые предусматривали обработку на оптимальном режиме двух партий образцов. При этом одна партия обрабатывалась с системой автоматического управления по реги-

страции момента достижения оптимальной глубины упрочненного слоя, а другая — без нее. Результаты исследований показали, что меньшие значения дисперсий (не более 0,5%) для параметров оптимизации (глубина упрочненного слоя, шероховатость поверхности и производительность процесса) получены для образцов с покрытиями, полученными при использовании системы автоматического управления, что говорит о стабильном протекании процесса.

Микроструктура нанесенного и упрочненного покрытия имеет особенности, которые сводятся к следующему: высокая плотность и однородность покрытия, наличие «зеренной» структуры; отсутствие дендритно-столбчатого строения и четко выраженной поверхности раздела между покрытием и основой; образование развитого диффузионного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке; увеличение протяженности зоны термического влияния с глубоким развитием в ней фазовых превращений как в феррите, так и в перлите; повышение твердости покрытия за счет диффузии углерода из нижележащих слоев (рис. 12).

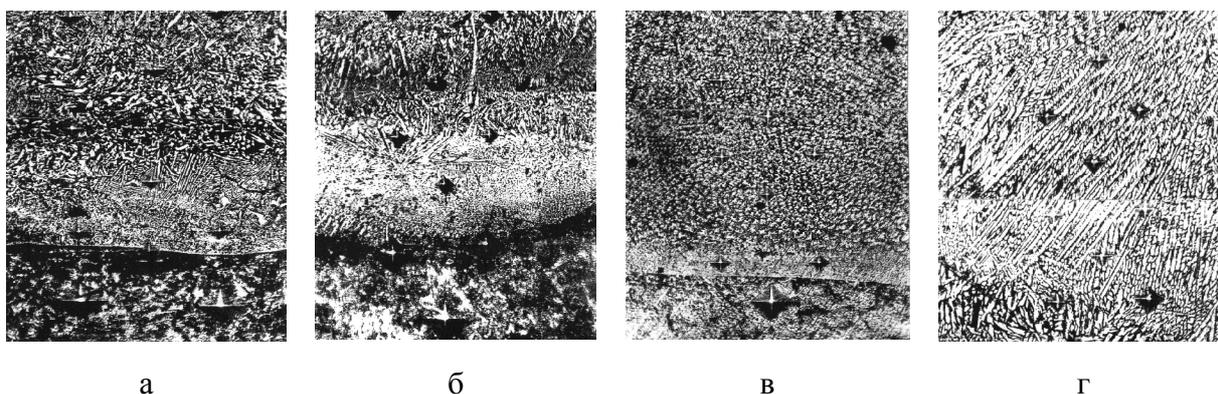


Рисунок 12. – Микроструктура покрытий: а – сормайт 1; б - ФБХ-6-2; в - ФБХ-6-2 (аргон); г – ферробор Б1

Общие закономерности в распределении углерода по глубине упрочненного слоя связаны с расшатыванием доменной структуры комбинированным магнитным полем (продольное поле электроимпульсного способа и внешнее поле комбинированного инструмента в форме скобы-

двухполюсника), поэтому наиболее целесообразно рассмотреть их общий характер (рис. 13).

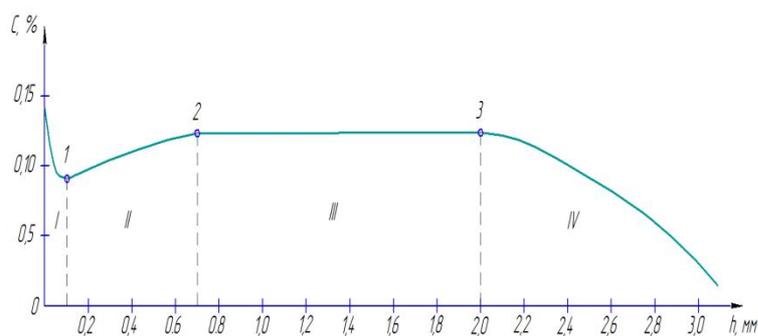


Рисунок 13. – Распределение содержания углерода по глубине упрочненного слоя

Анализ графика показывает, что существует три характерных участка. На участке I происходит интенсивное насыщение поверхностного слоя углеродом до 0,12...0,15%. Фазовые превращения аустенита

в мартенсит, прекращающиеся в точке 1. Наименьшее содержание углерода в точке 1 можно объяснить ослаблением массопереноса углерода из глубинных слоев к периферии. На участке 2 наблюдается рост содержания углерода до точки 2 за счет перемещения углерода в поверхностный слой из нижележащих слоев, что связано с явлением восходящей диффузии углерода, благодаря значительному градиенту полей упругих напряжений, вызванных движением дислокации и раскачиванием доменной структуры ферромагнетика комбинированным магнитным полем. Дальнейшая обработка (участок 3) не приводит к значительному изменению содержания углерода. Это может свидетельствовать об окончании гомогенизации упрочненного слоя и возникновения текстуры ориентированного мартенсита или перлита с однородностью физических свойств на всем протяжении участка. На участке 4 (в основе детали) происходит снижение содержания углерода до значений соответствующих материалу детали.

При неопределенности химического состава восстанавливаемой детали комбинированный способ обработки необходимо осуществлять присадочными порошками содержащие углерод не менее 0,1% и без применения смазочных материалов, так как их диффузия в поверхностный слой пре-

пятствует восходящей диффузии углерода, что ослабляет эффект обработки. Охлаждение рабочей зоны осуществляется обливом проточной водой и системой из водоподводящих трубок, вмонтированных в комбинированный инструмент в форме скобы-двухполюсника.

Результаты измерений твердости покрытий соответствуют микротвердости поверхностного слоя тех же покрытий, за исключением покрытий сормайт-1, микротвердость которого несколько выше по сравнению с покрытием ФБХ-6-2 в воздухе. Наибольшая твердость металлопокрытий достигается при нанесении ферробора Б1 и составляет 50...56 HRC.

Износостойкость покрытий, нанесенных порошком ферробора Б1 в 1,4...1,5 раза выше износостойкости эталонных образцов и совпадает с износостойкостью покрытий, нанесенных вибродуговой наплавкой с последующими термомеханической обработкой и закалкой токами высокой частоты. Использование защитного газа (аргон) повышает износостойкость покрытий до 10%.

Все покрытия имеют высокую прочность сцепления с основным металлом вследствие возникновения металлических связей, диффузии и растворимости элементов покрытия и основы по границе сплавления. Высокая прочность сцепления покрытий ФБХ-6-2 и сормайт-1 может быть объяснена повышенной междоатомной связью при легировании железа хромом. Присутствие хрупких элементов, например бора, и возможность окисления расплавленных частиц порошка, способствуют некоторому снижению прочности сцепления.

Характеристики упругости покрытий, полученных различными присадочными порошками, несущественно отличаются от характеристик основного металла образцов.

На поверхности образцов действуют незначительные по величине остаточные сжимающие осевые и окружные напряжения. При наплавке присадочных порошков на основу из стали 45 в центральной области

покрытия окружные  $\delta_o$  и осевые  $\delta_z$  остаточные напряжения незначительные сжимающие. Средние величины остаточных напряжений составляют  $\delta_o = -130 \dots -133$  МПа,  $\delta_z = -138 \dots -142$  МПа. В образовании сжимающих остаточных напряжений заложен основной резерв повышения долговечности восстановленных деталей.

Предел выносливости образцов практически совпадает с пределом выносливости образцов из нормализованной стали 45 и выше, чем при большинстве существующих способов восстановления.

Согласно разработанной электрической схеме исследовано влияние фазового угла смещения между напряжением, питающим комбинированный источник сварочного тока и напряжением, питающим электромагнитные катушки комбинированного инструмента в форме скобы-двухполюсника на стабильность процесса. Установлено, что оптимальный угол сдвига фаз составляет  $75^\circ$ .

Эксплуатационные испытания показали, что режущие ножи, восстановленные комбинированным способом обработки, успешно работают на сельскохозяйственных машинах (универсальных измельчителях). Разработанные технологические процессы внедрены на четырех ремонтно-технологических предприятиях с суммарным экономическим эффектом 3,2 млн. рублей при общей программе восстановления 4600 деталей в год.

### **Библиографический список**

1. Горохова М.Н., Чурилов Д.Г. Нанесение металлопокрытий электроконтактным способом: монография. – Москва: Изд-во РГАТУ, 2011. – 48 с.
2. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2010147725/02 РФ, МПК В23К 11/06, опубл. 27.05.2012. Способ электроконтактной роликовой приварки металлических ферромагнитных порошков / В.И. Черноиванов, М.Н. Горохова, И.М. Соцкая, П.С. Орлов, Д.Б. Слинко, М.Ю. Фузеева.
3. Патент № 119665 РФ, МПК В23К 9/04. Установка для электромагнитной наплавки / Д.Н. Бышов, М.Н. Горохова, Д.Г. Чурилов, С.Д. Полищук. Опубл. 27.08.2012. Бюл. №24.
4. Горохова М.Н., Полищук С.Д., Абрамов Ю.Н., Бышов Д.Н. Создание износостойких покрытий методами поверхностного пластического деформирования. – Рязань: Изд-во РГАТУ, 2012. – 225 с.

5. Горохова М.Н., Пучин Е.А., Бышов Н.В., Борычев С.Н. Нанесение износостойких покрытий комбинированными способами обработки в условиях малых ремонтных предприятий: монография. – Рязань: Изд-во РГАТУ, 2012. – 331 с.
6. Горохова М.Н., Полищук С.Д., Чурилов Д.Г., Горохов А.А. Восстановление и упрочнение деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле: монография. – Рязань: Изд-во РГАТУ, 2012. – 162 с.
7. Горохова М.Н., Бачурин С.Н., Бышов Д.Н., Абрамов Ю.Н., Горохов А.А. Нанесение износостойких покрытий электромагнитной наплавкой: монография. – Рязань: Изд-во РГАТУ, 2012. – 206 с.