

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



УДК 519.711.3:621.793:631.3.022

**В.И. Черноиванов, С.А. Соловьев, В.Ф. Аулов,
А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, В.В. Иванайский,
А.В. Соколов, А.Ю. Головенко, К.Э. Загороднов**
V.I. Chernoiivanov, S.A. Solovyev, V.F. Aulov,
A.V. Ishkov, N.T. Krivochurov, V.V. Ivanayskiy,
A.V. Sokolov, A.Yu. Golovenko, K.E. Zagorodnov

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Fe-B-Fe_nB ДЛЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗМАШИН

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORMATION OF COMPOSITE HARDENING BORIDE COVERINGS OF TRIPLE SYSTEM Fe-B-Fe_nB FOR AGRICULTURAL MACHINERY PARTS

***Ключевые слова:** ТВЧ-нагрев, процесс скоростного ТВЧ-борирования, композиционное упрочняющее покрытие, тройная система Fe-B-Fe_nB, математическое моделирование, полный факторный эксперимент.*

Проведены экспериментальные исследования процесса получения изолированных композиционных упрочняющих боридных покрытий тройной системы Fe-B-Fe_nB при ТВЧ-нагреве образцов из стали 65Г, предназначенных для повышения износостойкости рабочих органов сельхозмашин (ножи коромобрилок; лемеха культиваторов; стрельчатые

лапы сеялок, дисковые и анкерные сошники почвообрабатывающих комплексов и др.). Покрытия были получены из обзоров на основе порошковых смесей, содержащих технический карбид бора В₄С (5-20 мас.%) и плавный боратный флюс для индукционной наплавки П-0,66. Математическое моделирование осуществлено построением и последующей оптимизацией экспериментальных уравнений регрессии основных факторов процесса: температуры ТВЧ-нагрева, времени борирования и скорости ТВЧ-борирования, с выбором в качестве целевых функций относительной износостойкости покрытий и их толщины. Оптимизация осуществля-

лась в два этапа методом полнофакторного эксперимента по ортогональным планам 3^2 и 2^3 . Рабочая математическая модель плана 3^2 , которая может служить для прогнозирования износостойкости и толщины реального боридного покрытия на рабочем органе сельхозмашины, выполненном из стали 65Г, с вероятностью 0,95 и доверительным интервалом $\pm 5\%$, представляет собой систему полиномиальных уравнений 3-й степени. Графическое отображение поверхности отклика целевой функции толщины покрытия h , полученное по плану 2^3 для оптимальной температуры процесса 1100-1250°C в точке пинча, позволило определить, что изменение содержания флюса в интервале 10-14 мас. %, а времени ТВЧ-нагрева – в интервале 90-120 с приводит к получению на стали композиционного упрочняющего боридного покрытия с гарантированной толщиной до 300 мкм.

Keywords: RFC-heating, high-speed RFC-borating process, composite hardening coverings, triple system Fe-B-Fe_nB, mathematical modeling, full factorial experiment.

An experimental study of the formation of isolated composite hardening boride coverings of triple system Fe-B-Fe_nB was conducted at RFC-heating of samples from 65Mn steel, intended to improve wear resistance of agricultural machinery parts (feed mill

knives; tiller shares; sweeps of seeders, disk and hoe boots of tillers, etc.). The coverings were prepared from a powdered plaster mixtures containing technical boron carbide B₄C (5-20 wt. %) and fused borate flux for induction-welding P-0.66 (in Russian). Mathematical modeling was performed by the construction and subsequent optimization of the experimental regression equations of the major factors of the process: RFC-heating temperature, the time and speed of RFC-borating process; the relative wear resistance of coverings and their thickness were the criterion functions. The optimization was carried out in two stages by full factorial experiment in the orthogonal plans 3^2 and 2^3 . The working mathematical model of plan 3^2 , which may be used to predict the durability and thickness of real boride coating on a part of agricultural machinery made of steel 65Mn with a probability of 0.95 and confidence interval of $\pm 5\%$ is a system of polynomial equations in 3rd degree. A graphical representation of the response surface of the criterion function of covering thickness h received by the plan 2^3 for optimum process temperature 1100-1250°C in pinch-point allowed determining that the change in the flux content in the interval 10-14 wt. %, and the time of RFC-heating from 90-120 s results in the formation of guaranteed boride covering with the thickness up to 300 microns on the steel.

Черноиванов Вячеслав Иванович, д.т.н., проф., академик РАН, советник РАН, Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ГОСНИТИ), г. Москва. Тел.: (499) 174-83-05. E-mail: gosniti@mail.ru.

Соловьев Сергей Александрович, д.т.н., проф., директор, ГОСНИТИ, г. Москва. Тел.: (499) 171-37-27. E-mail: gosniti@list.ru.

Аулов Вячеслав Федорович, к.т.н., зав. лаб. № 21, ГОСНИТИ, г. Москва. Тел.: (499) 174-83-04. E-mail: gosniti@mail.ru.

Ишков Алексей Владимирович, к.х.н., д.т.н., зав. Барнаульским сектором лаб. № 21 ГОСНИТИ, проф., каф. ТКМиРМ, Алтайский государственный аграрный университет. Тел./факс: (3852) 62-83-80. E-mail: olg168@rambler.ru.

Иванайский Виктор Васильевич, д.т.н., с.н.с., проф., каф. ТКМиРМ, Алтайский государственный аграрный университет. Тел./факс: (3852) 62-83-80. E-mail: viv174@bk.ru.

Кривочуров Николай Тихонович, к.т.н., доцент, зав. каф. ТКМиРМ, Алтайский государственный аграрный университет. Тел./факс: (3852) 62-83-80. E-mail: krivochurov_nt@mail.ru.

Соколов Андрей Викторович, аспирант, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: sava2788@mail.ru.

Головенко Артем Юрьевич, студент, Алтайский государственный аграрный университет.

Загороднов Кирилл Эдуардович, студент, Алтайский государственный аграрный университет.

Chernoivanov Vyacheslav Ivanovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Member of Rus. Acad. of Sci., All-Russian Research and Technological Institute for Ag Machinery, Moscow. Ph.: (499) 174-83-05. E-mail: gosniti@mail.ru.

Solovyev Sergey Aleksandrovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Director, All-Russian Research and Technological Institute for Ag Machinery, Moscow. Ph.: (499) 171-37-27. E-mail: gosniti@list.ru.

Aulov Vyacheslav Fedorovich, Cand. Tech. Sci., Head. Lab. 21, All-Russian Research and Technological Institute for Ag Machinery, Moscow. Ph.: (499) 174-83-04. E-mail: gosniti@mail.ru.

Ishkov Aleksey Vladimirovich, Cand. Chem. Sci., Dr. Tech. Sci., Head. Barnaul Sector, Lab. 21, All-Russian Research and Technological Institute for Ag Machinery; Prof., Head of Chair of Technology of Design Materials and Machinery Repair, Altai State Agricultural University, Ph. / fax: (3852) 62-83-80. E-mail: olg168@rambler.ru.

Krivochurov Nikolay Tikhonovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Technology of Design Materials and Machinery Repair, Altai State Agricultural University. Ph./fax: (3852) 62-83-80. E-mail: krivochurov_nt@mail.ru.

Ivanayskiy Viktor Vasilyevich, Dr. Tech. Sci., Senior Staff Scientist, Prof., Chair of Technology of Design Materials and Machinery Repair, Altai State Agricultural University. Ph./fax: (3852) 62-83-80. E-mail: viv174@bk.ru.

Sokolov Andrey Viktorovich, Post-Graduate Student, Altai State Agricultural University. E-mail: sava2788@mail.ru.

Golovenko Artem Yuryevich, student, Altai State Agricultural University.

Zagorodnov Kirill Eduardovich, student, Altai State Agricultural University.

Введение

Продление срока службы, повышение надежности, восстановление и реновация различных деталей и узлов машин путем их упрочнения, нанесения различных износостойких и функциональных покрытий является актуальной задачей современного машиностроения [1]. В полной мере это относится и к таким быстроизнашивающимся деталям, как рабочие органы (РО) сельхозмашин (ножи кормодробилок; лемеха культиваторов; стрелчатые лапы сеялок, дисковые и анкерные сошники почвообрабатывающих комплексов и др.) [2]. Эти детали сельскохозяйственных машин работают в тяжело нагруженных условиях, контактируют своими рабочими поверхностями не только с металлом, смазкой или перерабатываемой биомассой, но и непосредственно с окружающей средой, при этом часто подвергаясь суточной и сезонной смене температур, что приводит к их повышенному износу, коррозии и сокращению сроков эксплуатации машины. Считается, что ресурс РО должен быть приближен к сроку эксплуатации машины до очередного (сезонного) технического обслуживания или ремонта, что и достигается их упрочнением различными способами [3].

В настоящее время наибольшее распространение получило упрочнение РО путём индукционной наплавки твёрдых сплавов и белых чугунов [4, 5], а также упрочнение химико-термической обработкой [6]. Однако первый способ характеризуется высокой стоимостью наплавляемых материалов, трудоёмкостью и наличием ярко выраженной границы раздела между поверхностью детали и износостойким покрытием, а второй – длительностью (2-8 ч), малой толщиной покрытия, высокими требованиями к персоналу и высокой стоимостью оборудования и оснастки.

Ранее нами был разработан новый способ упрочнения РО при скоростном ТВЧ-борировании, который позволяет получать на поверхности стальной детали слой композиционных упрочняющих боридных покрытий тройной системы $Fe_nB-Fe-B$, толщиной 350-600 мкм за время 1-2 мин. [7]. У изолированных покрытий были исследованы структура, фазовый состав и некоторые свойства, определены их типичная морфология и химический состав упрочняющих фаз. Совокупность найденных параметров композиционных боридных покрытий показала их перспективность для упрочнения РО [8]. Однако сложный, интегральный характер физико-химических процессов, ответ-

ственных за их формирование, возможное подплавление основной детали и окисление покрытий в процессе получения усложняют техническую и технологическую реализацию этого способа [9].

Поэтому оптимизация процесса получения таких покрытий и создание его математической модели необходимы для разработки промышленной технологии упрочнения.

Целью работы являлась разработка математической модели процесса получения композиционных боридных покрытий системы $Fe-B-Fe_nB$ на рабочих органах сельхозмашин, выполненных из стали 65Г, пригодной для оптимизации и последующей разработки технологий упрочнения.

Экспериментальная часть

Композиционные упрочняющие покрытия тройной системы $Fe-B-Fe_nB$ получали на образцах, размером 20×50×5 мм, вырубленных из проката стали 65Г по ГОСТ 14959-79 при ТВЧ-нагреве. ТВЧ-нагрев образцов осуществляли на промышленном высокочастотном инверторе ЭЛСИТ-100/20-70 в водоохлаждаемом индукторе, выполненном из медной трубки \varnothing 5 мм.

Образцы покрывали обмазкой на основе порошковых боридующих смесей, состоящих из технического карбида бора B_4C (5-20 мас.%) и плавящего боратного флюса для индукционной наплавки П-0,66 (остальное) [4], содержащего прокаленную буру $Na_2B_4O_7$, борный ангидрид B_2O_3 , силикокальций $CaSi_2$ и сварочный флюс АН-348А, при следующем соотношении компонентов, мас. %: 30, 20, 10, 40. Обмазку готовили на жидком стекле (2-5 мас.%), вводя его в состав за счет уменьшения доли флюса.

Температуру и скорость ТВЧ-нагрева определяли с помощью калиброванной ХА-термопары, подключенной по дифференциальной схеме к мультиметру DT830В, помещая ее холодный спай в лед с водой при $T = 0^\circ C$.

Толщину полученных покрытий определяли на поперечных шлифах с помощью отсчетного окуляра прибора ПМТ-3 металлографическим методом по ГОСТ 9.302-88. Износостойкость покрытий определяли по ГОСТ 23.208-79 при трении о нежестко закрепленный абразив на лабораторной установке, в сравнении с эталоном. В качестве эталона использовали образец из закаленной стали 65Г с твердостью 56-58 HRCэ.

Обработку экспериментальных данных, их статистический анализ и планирование

эксперимента проводили в среде программного прикладного ПО Statistica v. 10 и в программе Excel пакета Microsoft Starter 2010. При разработке математической модели использовали методы полного факторного эксперимента (ПФЭ) и определяли дисперсии опытов, однородность дисперсий по G-критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии математической модели сравнением с их доверительным интервалом с учетом t-критерия Стьюдента, адекватность модели – с помощью F-критерия Фишера [10].

Результаты и их обсуждение

Так как основная масса современных РО отечественных и зарубежных сельхозмашин выполнена из марганцовистых, хромистых и хромо-марганцовистых конструкционных легированных сталей 65Г, 40Х, 45Х, 50ХГА и их аналогов [11], для оптимизации процесса получения таких покрытий была выбрана сталь 65Г.

Математическое моделирование проводилось в два этапа. Сначала была проведена оптимизация процесса получения изолированных упрочняющих композиционных боридных покрытий тройной системы Fe-B-Fe_nB на стали 65Г по усеченному ортогональному плану ПФЭ типа 3² [9], когда в качестве основных влияющих факторов рассматривались: температура ТВЧ-нагрева, время борирования и скорость нагрева, в качестве целевых функций – относительная износостойкость и толщина боридного покрытия. После отыскания оптимальных значений температуры, времени и скорости ТВЧ-нагрева процесс оптимизировался по насыщенному ортогональному плану ПФЭ 2³ [10], когда в качестве основных влияющих факторов рассматривались содержание флюса П-0,66 в борировующем составе и время выдержки образца при оптимальной температуре борирования, а в качестве целевой функции – толщина боридного покрытия.

Первый этап. Для борированных образцов стали 65Г были построены экспериментальные уравнения регрессии, связывающие основные параметры скоростного ТВЧ-борирования (температура нагрева, время выдержки при заданной температуре, скорость нагрева и пр.) с целевыми функциями – толщиной *h* и относительной износостойкостью ε получающихся покрытий.

Для определения достоверных показателей разрабатываемой математической (статистической) модели и исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями, была выбрана трёхкратная повторность опытов, проведение опытов ранжировалось по времени и порядку проведения при помощи таблицы случайных чисел. Полученные значения целевых функций *h*, ε приведены в таблице 1.

Таблица 1
Средние значения целевых функций по результатам лабораторных опытов (n = 3, P = 0,95)

№ опыта	Среднее значение целевой функции		№ опыта	Среднее значение целевой функции	
	ε	<i>h</i> , мкм		ε	<i>h</i> , мкм
1	14,07	378	5	7,52	150
2	13,05	205	6	4,09	2
3	12,4	4	7	1	0
4	1	0	8	1	0

Области и интервалы варьирования различных факторов для ПФЭ плана 3² приведены в таблице 2. Относительная износостойкость ε использовалась как основной параметр оптимизации, а толщина упрочнённого слоя *h* – как ограничение. В качестве факторов были выбраны температура нагрева *T*, °С, время процесса борирования *t*, с, и скорость нагрева *V*, °С/с.

Теоретически модель, которую можно построить по результатам полного факторного эксперимента плана 3², может содержать до 8 членов и иметь вид следующего полинома [10]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

или в общем виде:

$$y = \sum_{\substack{1 \leq \alpha \leq 2 \\ 1 \leq \beta \leq 2}} b_{1\alpha 2\beta} \cdot X_1^\alpha \cdot X_2^\beta,$$

где α, β – индексы.

Ортогональная матрица планирования и среднее значение результатов опытов, для оценки вида целевой функции относительной износостойкости получаемого боридного покрытия ε , представлены в таблице 3, а для функции толщины покрытия – в таблице 4.

Таблица 2

Области и интервалы варьирования факторов модели

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Значение факторов в натуральном масштабе		
		$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{с}$	$V, ^\circ\text{C}/\text{с}$
Температура ТВЧ-нагрева	x_1	-	-	-
Время процесса борирования при ТВЧ-нагреве	x_2	-	-	-
Скорость ТВЧ-нагрева	x_3	-	-	-
Основной уровень	0	1050	45	33,5
Интервал варьирования (ΔX_i)	Δ_i	100	30	7
Верхний уровень	+1	1100	60	37
Нижний уровень	-1	900	30	30

После расчета коэффициентов значимости, дисперсий, критериев однородности и проверки адекватности в результате проведения ПФЭ плана 3^2 и статистической обработки нами была получена математическая модель для целевой функции относительной износостойкости получаемого композиционного упрочняющего боридного покрытия в зависимости от параметров: температуры нагрева $T, ^\circ\text{C}$, времени борирования $t, \text{с}$, и скорости ТВЧ-нагрева $V, ^\circ\text{C}/\text{с}$, в виде следующего уравнения регрессии:

$$\varepsilon = 6,822 + 1,925 \cdot x_1 + 2,972 \cdot x_2 + 3,42 \cdot x_3 - 0,925 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,068 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,57 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,783 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (2)$$

где ε – относительная износостойкость боридного покрытия;

h – толщина боридного покрытия;

x_1 – температура нагрева, $^\circ\text{C}$;

x_2 – время выдержки при заданной температуре;

x_3 – скорость нагрева, $^\circ\text{C}/\text{с}$.

Аналогичное уравнение для целевой функции толщины покрытия имеет вид:

$$h = 92,375 + 40,635 \cdot x_1 + 91,375 \cdot x_2 + 54,375 \cdot x_3 + 39,625 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,725 \cdot x_1 \cdot x_3 + 53,375 \cdot x_2 \cdot x_3 + 2,525 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3)$$

Относительную силу влияния отдельных факторов в модели определяли по принципу Парето [12], представляя их в виде диаграммы (пример для целевой функции относительной износостойкости боридного покрытия ε приведен ниже).

Из анализа рисунка 1 следует, что наиболее сильное влияние на относительную износостойкость боридного покрытия оказывают скорость нагрева V и время выдержки при заданной температуре t , также заметное влияние оказывают температура нагрева T и тройное взаимодействие этих факторов. Эффект же от двойного взаимодействия факторов выражен слабо. Корреляция между наблюдаемыми (экспериментальными) и модельными (предсказанными) значениями износостойкости приведена на рисунке 2.

Таблица 3

Матрица планирования ПФЭ плана 3^2 и результаты опытов для целевой функции относительной износостойкости ε

№ п/п	Значение факторов в натуральном масштабе			Кодированное значение факторов			Функция отклика (относительная износостойкость) ε
	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{с}$	$V, ^\circ\text{C}/\text{с}$	x_1	x_2	x_3	
1	1100	60	37	+1	+1	+1	14,07
2	900	60	37	-1	+1	+1	13,05
3	1100	30	37	+1	-1	+1	12,4
4	900	30	37	-1	-1	+1	1
5	1100	60	30	+1	+1	-1	7,52
6	900	60	30	-1	+1	-1	4,09
7	1100	30	30	+1	-1	-1	1
8	900	30	30	-1	-1	-1	1

Матрица планирования ПФЭ плана 2³ и результаты опытов для целевой функции толщины боридного покрытия h

№ п/п	Значение факторов в натуральном масштабе			Кодированное значение факторов			Функция отклика (толщина упрочнённого слоя)
	T, °C	t, с	V, °C/с	x ₁	x ₂	x ₃	h, мкм
1	1100	60	37	+1	+1	+1	378
2	900	60	37	-1	+1	+1	205
3	1100	30	37	+1	-1	+1	4
4	900	30	37	-1	-1	+1	0
5	1100	60	30	+1	+1	-1	150
6	900	60	30	-1	+1	-1	2
7	1100	30	30	+1	-1	-1	0
8	900	30	30	-1	-1	-1	0

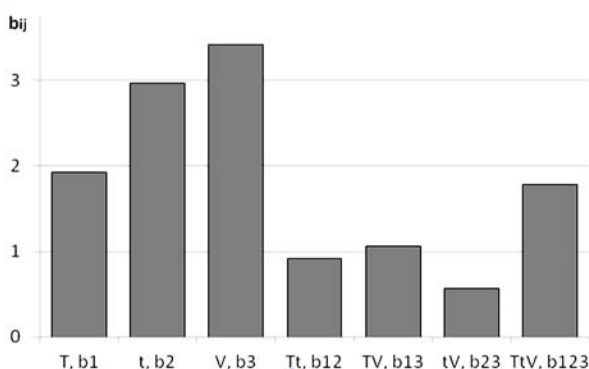


Рис. 1. Относительная сила влияния факторов и их взаимодействия на относительную износостойкость боридного покрытия ε

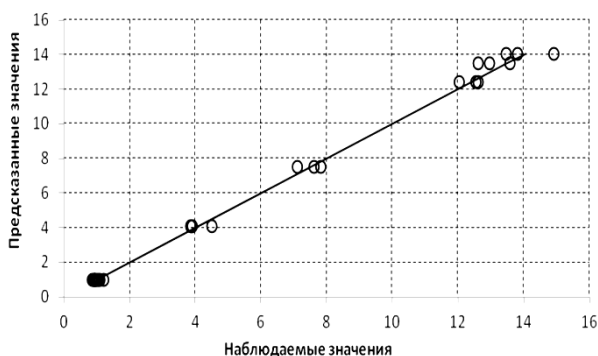


Рис. 2. Корреляция между предсказанными с помощью математической модели и полученными экспериментально значениями относительной износостойкости боридного покрытия ε

Тогда рабочая математическая модель, которая может служить для прогнозирования износостойкости и толщины реального боридного покрытия на рабочем органе сельхозмашины, выполненном из стали 65Г, с вероятностью 0,95 и доверительным интервалом $\pm 5\%$, после отброса незначимых членов и перевода факторов из кодированных в естественные, будет представлять собой следующую систему уравнений:

$$\varepsilon = 537,938 - 0,557 \cdot x_1 - 10,569 \cdot x_2 - 17,487 \cdot x_3 + 0,011 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,018 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,339 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (4)$$

$$h = 1206,143 - 0,376 \cdot x_1 - 37,633 \cdot x_2 - 18,071 \cdot x_3 + 0,010 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,012 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,517 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Второй этап. Здесь в качестве факторов планирования нами были выбраны содержание флюса П-0,66 в борирующей смеси и время выдержки заготовки при заданной (оптимальной) температуре t , а в качестве целевой функции – толщина боридного покрытия h . Содержание основного борирующего агента V_4C может не учитываться, так как его количество может быть легко отрегулировано за счёт изменения толщины обмазки. Оптимальная температура борирувания, рассчитанная с использованием системы уравнений 4 и подтвержденная нами экспериментально, составила величину 1100-1250°C. Ортогональная матрица планирования ПФЭ плана 2³ и результаты опытов представлены в таблице 5.

Теоретическая математическая модель, которую можно построить по результатам полного факторного эксперимента плана 2³, может содержать до 9 членов и также иметь вид полинома 1.

После расчета коэффициентов значимости, дисперсий, критериев однородности и проверки адекватности в результате проведения ПФЭ плана 2³ и статистической обработки нами была получена регрессионная математическая модель для толщины боридного покрытия в зависимости от параметров: содержание флюса П-0,66 в борирующем составе и времени выдержки при заданной температуре t :

Матрица планирования ПФЭ плана 2³ и результаты опытов для целевой функции толщины боридного покрытия

№ п/п	Состав				Член модели	Функция отклика (толщина упрочнённого слоя h), мкм
	доли единиц		П-0,66, мас. %	t , с		
	x_1	x_2				
1	0	0	8	76	b_0	293
2	1	0	14	76	$b_1 X_1$	402
3	2	0	20	76	$b_{11} X_1^2$	195
4	0	1	8	106	$b_2 X_2$	264
5	1	1	14	106	$b_{12} X_1 X_2$	450
6	2	1	20	106	$b_{112} X_1^2 X_2$	230
7	0	2	8	136	$b_{22} X_2^2$	471
8	1	2	14	136	$b_{122} X_1 X_2^2$	45
9	2	2	20	136	$b_{1122} X_1^2 X_2^2$	20

$$h = 450 - 17,1 \cdot x_1 - 178,3 \cdot x_2 - 88,25 \cdot x_1 \cdot x_2 - 203,000 \cdot x_1^2 - 226,5 \cdot x_2^2 + 179,25 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 120,25 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 224,25 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2, \quad (5)$$

где h – толщина боридного покрытия;

x_1 – содержание флюса П-0,66% по массе;

x_2 – время выдержки при заданной температуре, с.

Анализ относительной силы влияния факторов по принципу Парето [12] показал, что все рассматриваемые факторы оказывают влияние на целевую функцию – толщину боридного покрытия, однако наименьшее влияние на h оказывает содержание флюса П-0,66 в составе порошковой смеси для борирования.

Рабочая математическая модель, которая может служить для прогнозирования толщины реального боридного покрытия на рабочем органе сельхозмашины, выполненном из стали 65Г, с вероятностью 0,95 и доверительным интервалом $\pm 5\%$, после отброса незначимых членов и перевода факторов из кодированных в естественные удобно представить в виде поверхности отклика указанной целевой функции в зависимости от изменения количества флюса и времени выдержки при заданной температуре процесса (рис. 3).

Как следует из рисунка 3, поверхность отклика функции h зависимости от содержания флюса и времени выдержки при оптимальной температуре ТВЧ-нагрева имеет сложный, седловидный профиль, указывающий на неоднозначный характер влияния этих факторов.

Так, в окрестности точки пинча найденной нами поверхности отклика при содержании флюса П-0,66 в борлирующем составе от 11 до 16% мас. время выдержки при

оптимальной температуре ТВЧ-нагрева (1100-1250°C) в диапазоне от 70 до 125 с, не оказывает особого влияния на толщину покрытия, которая в данном случае находится в пределах от 400 до 500 мкм [12]. Увеличение же содержания флюса выше 16% мас. приводит к резкому снижению толщины боридного покрытия – вплоть до нуля, при этом контролируемое уменьшение содержания флюса в борлирующей порошковой смеси позволяет получать толщину покрытия до 600 мкм в том случае, если время выдержки будет увеличиваться.

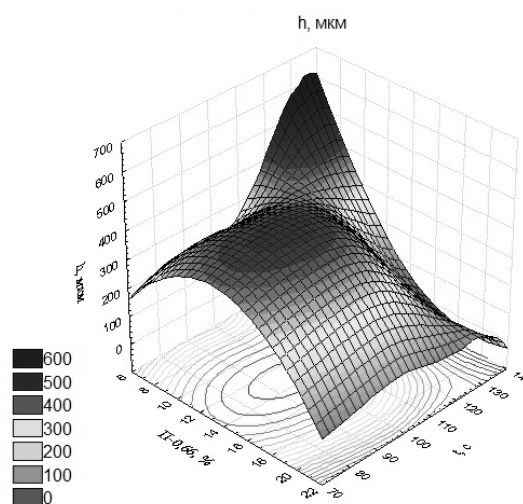


Рис. 3. Поверхность отклика целевой функции толщины покрытия на поле факторов содержания флюса П-0,66 и времени выдержки образца при оптимальной температуре ТВЧ-нагрева

Вместе с тем с точки зрения технологичности процесса скоростного ТВЧ-борирования диапазон исследуемых параметров, при котором получается боридное покрытие толщиной от 300 до 400 мкм, составляет для количества флюса П-0,66 в

составе борлирующей смеси – от 11 до 16 мас.%, для времени выдержки – от 70 до 125 с.

По результатам проведенного полнофакторного эксперимента нами также были проведены контрольные опыты, которые подтвердили зависимости (2)-(5), полученные выше.

Выводы

1. Установлено, что все исследованные характеристики скоростного ТВЧ-борлирования (скорость нагрева, время выдержки при заданной температуре, температура нагрева) оказывают влияние на параметры процесса получения композиционных упрочняющих боридных покрытий в системе Fe-B-Fe_nB.

2. Получены теоретические математические (статистические) модели (в виде полиномиальных уравнений регрессии 3-й степени), которые позволяют описывать зависимость таких целевых функций получающихся покрытий, как износостойкость и толщина, от величины исследованных параметров процесса (температура нагрева T , °C, время процесса борлирования t , с, и скорость нагрева V , °C/с) в технологически обоснованных интервалах их изменения.

3. Рабочие математические модели, полученные методом ПФЭ по ортогональным планам 3^2 и 2^3 , могут служить для прогнозирования износостойкости и толщины реального боридного покрытия на рабочем органе сельхозмашины, выполненном из стали 65Г, с вероятностью 0,95 и доверительным интервалом $\pm 5\%$.

4. Получено графическое отображение поверхности отклика целевой функции толщины h , которая зависит от количества флюса П-0,66 и времени ТВЧ-нагрева при оптимальной температуре 1100-1250°C, позволившее определить, что изменение содержания флюса в интервале 10-14 мас.%, а времени ТВЧ-нагрева – в интервале 90-120 с приводит к получению на стали 65Г композиционного упрочняющего боридного покрытия с гарантированной толщиной до 300 мкм.

Библиографический список

1. Методы упрочнения поверхностей деталей машин: сб. научн. ст. / ред. Г.И. Москвитин. – М.: Красанд, 2008. – 400 с.

2. Михальченков А.М., Феськов С.А. Износы культиваторных лап посевного комплекса «Моррис» // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 10. – С. 55-58.

3. Черноиванов В.И., Горячев С.А. Основные подходы к ремонту и повышению уровня сервиса сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. – 2012. – № 12. – С. 2-4.

4. Ткачëв В.Н., Фиштейн Б.Ч., Казинцев Н.В. и др. Индукционная наплавка твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.

5. Курбанова М.Г., Черныш А.П., Санкина О.В. и др. Повышение износостойкости функциональных поверхностей рабочих органов механизмов измельчения и перемешивания биогазовой установки // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 5. – С. 79-80.

6. Борисенок Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Metallurgia, 1981. – 424 с.

7. Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Ишков А.В. Состав, структура и свойства износостойких боридных покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борлировании // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 68-72.

8. Аулов В.Ф., Иванайский В.В., Ишков А.В. и др. Получение износостойких композиционных боридных покрытий на стали 65Г при ТВЧ-нагреве // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 139-145.

9. Ишков А.В., Иванайский В.В., Кривошуров Н.Т. и др. Термодинамическое обоснование химических реакций в системе В4С-боратный флюс-Fe при ТВЧ-нагреве // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 3-1 (83). – С. 199-203.

10. Блохин В.Г., Глудкин О.П., Гуров А.И. и др. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов: учебник. – М.: Радио и связь, 1997. – 232 с.

11. Флик Э.П. Развитие деталей и узлов сельхозмашин в России // Тракторы и сельхозмашины. – 2008. – № 12. – С. 12-14.

12. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей: справочник / под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.

References

1. Metody uprochneniya poverkhnostei detalei mashin: sb. nauchn. st. / red. G.I. Moskvitin. – M.: Krasand, 2008. – 400 s.

2. Mikhal'chenkov A.M., Fes'kov S.A. Iznosy kul'tivatornykh lap posevnogo kompleksa «Morris» // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2013. – № 10. – S. 55-58.

3. Chernoi Ivanov V.I., Goryachev S.A. Osnovnye podkhody k remontu i povysheniyu urovnya servisa sel'skokhozyaistvennoi tekhniki // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2012. – № 12. – С. 2-4.

4. Tkachev V.N., Fishtein B.Ch., Kazintsev N.V. i dr. Induktsionnaya naplavka tverdykh splavov. – M.: Mashinostroenie. – 1970. – 183 s.

5. Kurbanova M.G., Chernysh A.P., Sankina O.V. i dr. Povyshenie iznosostoikosti funktsional'nykh poverkhnostei rabochikh organov mekhanizmov izmel'cheniya i peremeshivaniya biogazovoi ustanovki // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2013. – № 5. – S. 79-80.

6. Borisenok G.V., Vasil'ev L.A., Voroshnin L.G. i dr. Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov: spravochnik; pod red. L.S. Lyakhovicha. – M.: Metallurgiya. – 1981. – 424 s.

7. Mishustin N.M., Ivanaiskii V.V., Ishkov A.V. Sostav, struktura i svoystva iznosostoi-kikh boridnykh pokrytii, poluchennykh na sta-

lyakh 658G i 50KhGA pri skorostnom TVCh-borirovanii // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2012. – T. 320. – № 2. – S. 68-72.

8. Aulov V.F., Ivanaiskii V.V., Ishkov A.V. i dr. Poluchenie iznosostoi-kikh kompozitsionnykh boridnykh pokrytii na stali 65G pri TVCh-nagreve // Trudy GOSNITI. – 2014. – T. 115. – S. 139-145.

9. Ishkov A.V., Ivanaiskii V.V., Krivochurov N.T. i dr. Termodinamicheskoe obosnovanie khimicheskikh reaktsii v sisteme B4C-boriatnyi flyus-Fe pri TVCh-nagreve // Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – № 3-1 (83). – S. 199-203.

10. Blokhin V.G., Gludkin O.P., Gurov A.I. i dr. Sovremennyy eksperiment: podgotovka, provedenie, analiz rezul'tatov: uchebnyk. – M.: Radio i svyaz', 1997. – 232 s.

11. Flik E.P. Razvitie detalei i uzlov sel'khoz mashin v Rossii // Traktory i sel'khoz mashiny. – 2008. – № 12. – S. 12-14.

12. Aivazyan S.A., Enyukov I.S., Meshal'kin L.D. Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostei: spravochnik; pod red. S.A. Aivazyana. – M.: Finansy i statistika, 1985. – 487 s.



УДК 634.74.631.535

В.Д. Бартенеv, А.А. Канарский
V.D. Bartenev, A.A. Kanarskiy

ОСНОВНЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И КРАТКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОЦЕНКА ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА УБОРКЕ ОБЛЕПИХИ

BASIC COMPARATIVE FEATURES OF THE DESIGN, BRIEF DESCRIPTION AND THE EVALUATION OF EQUIPMENT TESTING AT SEA-BUCKTHORN HARVESTING

Ключевые слова: облепиха, уборка, технические средства, особенности конструкций, оценка испытаний, модернизация машины.

Расширение площадей под облепихой ограничивается из-за высокой трудоемкости ручного сбора, составляющей около 90% от общих трудозатрат на ее возделывание. Решение проблемы уборки сдерживается сложностью, обусловленной специфическими физико-механическими свойствами плодов и агробиологическими особенностями растений. Приведены основные конструктивные особенности (преимущества и недостатки) трех основных технических средств, которые прошли многолетние исследовательские испытания на уборке облепихи в ФГБНУ НИИСС. Кратко изложены техническая характеристика и оценка их работы. Экспериментальный образец отечествен-

ного облепихоуборочного комбайна СВК-4Д, серийный образец универсального ягодоуборочного комбайна «Йоонас-2000» (Финляндия) и экспериментальный образец машины мобильной прицепной для отделения плодов со срезанных скелетных ветвей с одновременным разделением вороха на компоненты показали при испытании принципиальную работоспособность, удовлетворительное и стабильное выполнение технологического процесса. Приведены основные конструктивные и эксплуатационно-технологические недостатки, выявленные при испытании вышеуказанных технических средств. Сформулированы и приведены следующие рекомендации и предложения по дальнейшему проведению ОКР по уборочным техническим средствам. Комбайн СВК-4Д требует коренной конструктивной доработки, изготовления опытного образца и проведения приемочных ис-