

**Соловых Е.К.,\***  
**Волков Ю.В.,\***  
**Ворона Т.В.,\***  
**Лопата Л.А.,\***  
**Николайчук В.Я.,\*\***  
**Дудан А.В.\*\*\***

\*Кировоградский национальный технический университет,  
г. Кропивницкий, Украина

\*\*Винницкий аграрный технический университет, г. Винница, Украина

\*\*\*Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь

**E-mail:** beryuza@ukr.net

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИПЕКАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ И УПРОЧНЕНИИ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ

*УДК 621.793.620.172*

В статье на основе экспериментальных исследований и с использованием методов математического моделирования представлена комплексная оценка влияния основных технологических параметров (давления, тока припекания, скорости) процесса электроконтактного припекания дискретных покрытий (ЕКПДП) на физико-механические свойства полученных покрытий (пористость и износостойкость). Многофакторный эксперимент с определенным варьированием этих параметров позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий и выявить эффекты взаимодействия. Сделан вывод о том, что с целью улучшения физико-механических свойств получаемых покрытий целесообразно комплексно использовать все три технологические параметры рассматриваемого процесса.

**Ключевые слова:** дискретные покрытия, электроконтактное припекание, оптимизация, износостойкость, пористость, технологические параметры

### Состояние и актуальность проблемы.

Среди агрегатов автомобилей, судовых машин и механизмов наименее надежный и долговечный агрегат - двигатель. Это объясняется тем, что детали двигателя в процессе эксплуатации подвергаются активному химическому и механическому воздействию, значительным усилиям. Срок службы двигателей определяется износом поршневых колец, канавок поршней, цилиндров, подшипников и шеек коленчатого вала. Срок службы деталей двигателя зависит от качества материала, из которого они изготовлены, их термической и механической обработки, точности сборки двигателя и от других конструктивных и производственных факторов. Практика показывает, что при одних и тех же конструктивных данных и одинаковых производственных условиях изготовления влияние на срок службы деталей оказывают условия эксплуатации и режим работы двигателя. При работе двигателя на изнашивание деталей влияют такие факторы: среда, число его пусков и остановок, температурный и нагрузочный режимы, вибрация и деформация деталей. Различие режимов работы двигателя приводит к изменению его температурного и нагрузочного режимов работы. Скорость изнашивания деталей непрерывно меняется в зависимости от того, с какой активностью действуют в данный отрезок времени на изнашивание такие факторы, как число запусков двигателя и их длительность, неравномерность нагрузочного и температурного режимов и т. п.

Валы изнашиваются вследствие воздействия на них физических, химических и других факторов. Периодически действующие давление газов и инерционная сила передают коленчатому валу толчки, скручивают его и изгибают, вызывая упругие деформации. В результате упругих деформаций в вале возникают внутренние напряжения. При совпадении периодов и направлений давления газов и инерционной силы, с одной стороны, и внутренних упругих напряжений — с другой, амплитуда колебаний вала возрастает, что приводит к образованию в наиболее напряженных местах (галтелях и щеках) усталостных трещин, развитие которых может вызвать поломку вала.

На износ коленчатого вала и подшипников влияют качество и свойства смазочного масла. Практика показывает, что неудовлетворительное состояние масла и узлов системы смазки, в особенности фильтрующих устройств, значительно усиливает изнашивание шеек коленчатых валов. Продукты износа, попадая с маслом в подшипники вала, оседают в антифрикционном слое и изнашивают его шейки. Коленчатые валы могут иметь следующие дефекты: овальность, конусность и повреждение шатунных и коренных шеек (задиры, глубокие риски, вмятины, следы коррозии или значительная волнистость их поверхности), износ шпоночной канавки; прогиб; износ маслосгонной резьбы, износ посадочных мест.

Большинство деталей двигателей восстанавливают известными способами наплавки и плазменного напыления, которые энергоемки, трудоемки и не обеспечивают необходимое их качество. Перспективным и эффективным средством решения этой проблемы является применение износостойких покрытий дискретной структуры. [1-2]. Принцип формирования покрытий дискретной структуры заключается замене сплошного покрытия на прерывистое, имеющее дискретную структуру [1-2].

Разработан способ получения покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием [3-4]. Электроконтактное припекание состоит в нанесение на поверхность детали слоя порошкового материала и его последующее спекание и припекание к детали при воздействии внешнего давления специальным электродом-инструментом [3-4]. Электроконтактный способ относится к способам с минимально необходимым нагревом, что исключает термическое деформирование упрочняемых деталей. Зона термического влияния тока на деталь, вследствие малой длительности нагрева, составляет 0,1...0,3мм. Основные технологические особенности электроконтактного припекания дискретных покрытий (ЭКПДП) – получение покрытий практически 100% плотности с прочностью сцепления 180-220 МПа и толщиной до 3мм с минимальными (до 0,2 мм) припусками на механическую обработку или ее исключение за счет совмещения припекания и поверхностно-пластического деформирования (ППД) в одном процессе [3-4].

С развитием технологий нанесения покрытий дискретной структуры возможности эмпирически-интуитивных подходов в выборе конструктивных схем покрытий и технологических режимов исчерпали себя [3-4]. Без подходов механики деформируемого твердого тела (анализа напряженно-деформированного состояния [5], расчетов на прочность и определения комплекса механических свойств [5] на стадии проектирования и ведения технологического процесса невозможно создание прочной и долговечной детали с покрытием. Ввиду сложности физико-химических процессов, происходящих при нанесении покрытий, существующие аналитические зависимости [1-2, 5] не дают возможность его описать и всесторонне изучить. Поэтому, эксперимент - один из основных средств получения информации об исследуемом процессе. При отработке технологии нанесения покрытий экспериментальные исследования проводят на образцах, так как непосредственное нанесения покрытий на детали и испытание их на реальных объектах – трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Выбор покрытий и оптимизация технологий их получения весьма сложен, так как структура, толщина покрытия, оптимальны с точки зрения адгезионных свойств, составов покрытий и зависят от многих факторов. Для оптимизации технологии получения покрытий, грамотного их применения, необходимо глубокое знание механизмов разупрочнения и разрушения покрытий, их влияния на прочность защищаемых деталей и долговечность в различных температурно-силовых условиях.

Отличие свойств защищаемого материала и покрытия, неизбежное формирование особой переходной зоны на границе контакта покрытия и защищаемого материала вынуждает рассматривать систему “основа-покрытие” как конструкцию. Трудно контролируемое возникновение полей остаточных напряжений, низкая достоверность информации о характере изменений свойств материала основы в области переходной зоны существенно затрудняют корректную оценку реального напряженно-деформированного состояния материала, обоснованный выбор критериев предельного состояния и долговечности покрытий.

Характерной особенностью методов поверхностного упрочнения является то, что не удается получить одновременного повышения всех эксплуатационных свойств детали для всех режимов эксплуатации. Даже один и тот же материал покрытия, но нанесенный разными способами, показывает различные эксплуатационные свойства. Каждая из этих задач с точки зрения экспериментальной механики материалов требует своих методических подходов и аналитических методов описания закономерностей, необходимых для оптимизации технологических процессов и прогнозирования реального ресурса изделий с покрытиями.

### **Цель и постановка задач исследований.**

Цель исследований - сокращение экспериментальных работ по определению параметров ЭКПДП и получение максимальной информации из проведенных экспериментов путем использования методов многофакторного планирования эксперимента и математической обработки статистических данных.

Без применения статистических методов невозможно решить задачу, которая возникает перед экспериментатором: как провести и обработать результаты эксперимента, чтобы получить максимум достоверной информации. Экспериментально-статистические методы - один из главных инструментов в научном познании и в конструкторско-технологических разработках. Такой подход дает возможность представить процесс создания покрытий дискретной структуры в виде функциональной зависимости входных и выходных параметров. Эта зависимость определяет оптимальные режимы, которые обеспечивают максимальные/минимальные значения выходных параметров. Вопросы оптимизации занимают ключевое место. Это объясняется тем, что большое количество технологических параметров в сочетании

с обширной номенклатурой материалов, из которых формируют покрытие, предоставляют технологам широкий ряд альтернативных вариантов.

Разработка технологического процесса связана с решением оптимизационных задач. Задача оптимизации режимов создания дискретных покрытий электроконтактным припеканием (ЭКП) рассматривается как многофакторная (с учетом конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов) и многокритериальная (с использованием нескольких критериев – комплекса физико-механических свойств).

### Методика исследований.

Комплексная оценка свойств покрытий дискретной структуры, полученных электроконтактным припеканием, и их зависимость от параметров ЭКПДП представлено в количественной форме – в виде математической модели. При построении математической модели процесса электроконтактного припекания дискретных покрытий (ЭКПДП) ограничились схематическим, упрощенным представлением объекта исследований в виде винеровского «черного ящика» [6], когда математической моделью объекта исследований есть совокупность соотношений вида [6]:

$$Y_{\text{мод}} = f(X_i, Y_j, Z_r), \quad (1)$$

где  $Y_{\text{мод}}$  – выходной параметр (критерий оптимизации);

$X_i$  – совокупность значений входных параметров, которые контролируются и управляются;

$Y_j$  – входные параметры, которые контролируются, но не управляются;

$Z_r$  – входные параметры, которые не управляются и не контролируются.

В практике используют  $X_i = \text{var}$  при фиксированных параметрах  $Y_j = \text{const}$  и  $Z_r = \text{const}$ . Параметр оптимизации  $Y$  представлен в виде функции:

$$Y = f_{\text{опт}}(X_i = \text{var}; Y_j = \text{const}; Z_r = \text{const}) \quad (2)$$

при  $X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}$ .

Статистической математической моделью объекта является функция отклика, которая связывает параметр  $Y$ , характеризующийся результатами эксперимента, со сменными параметрами  $X_i$ , которыми варьируют при проведении эксперимента:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k). \quad (3)$$

Независимые переменные  $X_i$  называют факторами, координатный простор с координатами  $X_1, X_2, \dots, X_k$  – факторным пространством, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве – поверхностью отклика. При ограниченных знаниях о механизмах процесса создания покрытий аналитический вид функции отклика неизвестен. Поэтому представление функции отклика ограничивают полиномом [6]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i<j<l}^k b_{ijl} X_i X_j X_l, \quad (4)$$

где  $Y^*$  – расчетное значение параметра оптимизации,

$b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – выборочные коэффициенты, которые можно получить методами регрессионного анализа, используя результаты эксперимента.

Математическое моделирование процесса электроконтактного припекания покрытий дискретной структуры включает такие этапы: выбор управляемых параметров и уравнений варьирования их значений, выбор критериев, построение рабочей матрицы проведения исследований, построение математических моделей по результатам проведенных исследований, проведение статистического исследования этих моделей и вычислительного эксперимента [6-7].

Построение плана эксперимента проведено в соответствии с рекомендациями работ [6-7]. Использован план эксперимента, сгенерированный на основе ЛП<sub>т</sub> - чисел и математический аппарат [6]. Эти планы имеют ряд преимуществ [6-7]:

- при «выпадении» одного из экспериментов свойства плана ухудшаются в пределах, которые позволяют его использовать;
- эти планы одновременно являются и планами поиска оптимальных условий и позволяют более глубоко анализировать исследуемую область;
- планы на основе ЛП<sub>т</sub> - чисел могут быть использованы как последовательные, т.е. затраты могут увеличиваться постепенно и предыдущие результаты объединяются с последующими результатами.

Конструирование плана эксперимента проведено с помощью пакета прикладных программ (ППП) ПРИАМ (планирование, регрессия и анализ моделей) [7]. Следующий этап - проведение экспериментов в соответствии с сгенерированной рабочей матрицей плана. После проведения экспериментов и анализа их результатов рассчитывались средние значения отклика и дисперсия по каждому эксперименту. Адекватность, воспроизводимость и информативность модели оценивали G-критерием Кохрена, F-критерием Фишера, критерием Стьюдента, коэффициентом корреляции R [6-7].

Для поиска оптимальной точки строили многофакторные математические модели. Если задано несколько критериев, то их общие значения выбирают, используя принцип компромисса по Паретто [6-7]. Идея компромисса по Паретто заключается в поиске условий функционирования системы, при которых обобщенный критерий ее оптимальности достигает экстремального значения. Для определения наилучшей точки использовали пакет прикладных программ ППП ПРИАМ [7].

### Результаты исследований.

С целью комплексной оценки влияния параметров ЭКПДП (табл. 1) на износостойкость и пористость покрытий использовались методы математического планирования [6]. Износостойкость и пористость покрытий, полученных ЭКПД являются функциями параметров процесса ЭКП (давления, силы тока, времени импульсов и пауз).

Таблица 1

#### Значения параметров ЭКПДП

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина
1	2	3	4
Сила тока	$I$	кА	8-16
Давление	$P$	МПа	20-100
Время импульсов/пауз	$t_{им} / t_{п}$	С	0,02-0,2

Факторы и их уровни приведены в таблице 2. Размерами оптимизации являлись: пористость ( $\Pi$ ) и износостойкость ( $J_n$ ). Был реализован полный факторный эксперимент вида  $2^3$  с варьированием на 3-х уровнях технологических факторов: ток на электродах; давление на электродах; время импульсов/пауз. Количество опытов  $N_j = 16$ .

Таблица 2

#### Значения варьируемых факторов и их уровни

Уровни	Факторы			Кодированное значение факторов
	P, МПа	t, сек	I, кА	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
Нижний	20	0,02	8	-1
Верхний	100	0,2	16	+1
Нулевой	60	0,04	12	0
Интервал варьирования	20	0,02	2	-

Количество измерений в каждом опыте при определении пористости  $\Pi - n = 6$ , а при измерении износостойкости  $J_n - n = 3$ . Под количеством измерений понималось количество образцов, на которых определялось значение параметра оптимизации в каждом опыте  $j$ . Значение пористости определялось как среднее арифметическое измерений на каждом образце. В качестве исходных данных использовались

матрица планирования (табл. 3) и результаты исследований. По результатам исследований построена математическая модель (5) зависимости критерия оптимизации, который характеризует пористость покрытий от параметров ЭКПДП (табл. 3). Расчет моделей осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ [7].

$$Y_1 = 3,25576 + 2,37774x_3^2 - 2,07533x_2^3 + 0,545923x_1^3x_2 - 0,842191x_1^3 + 0,284621x_2^3x_3^2 - 1,51418x_1^2x_2^2 - 1,45394x_3^3 - 0,73219x_1^3 - 1,95605x_2x_3^3 - 1,65074x_2^2 + 1,15314x_2^2x_3^3 \quad (5)$$

где  $Y_1$  – математическая модель в кодированных значениях для пористости покрытия.

Формулы перехода от кодированных значений факторов к натуральным:

$$x_1 = 0,0363636 (X_1 - 32,5);$$

$$x_1^2 = 1,88514(X_1^2 - 0,114165X_1 - 0,355372);$$

$$x_1^3 = 4,88078(X_1^3 - 0,225599X_1^2 - 0,645588X_1 + 0,0396005);$$

$$x_2 = 39,0244(X_2 - 0,035625);$$

$$x_2^2 = 1,61971(X_2^2 - 0,0355966X_2 - 0,418203);$$

$$x_2^3 = 3,71976(X_2^3 + 0,0382814X_2^2 - 0,76032X_2 - 0,030896);$$

$$x_3 = 0,326531 (X_3 - 4,9375);$$

$$x_3^2 = 1,68391(X_3^2 - 0,055512X_3 - 0,379425);$$

$$x_3^3 = 4,43393(X_3^3 - 0,035212X_3^2 - 0,736017X_3 - 0,00770233).$$

Таблица 3

### Матрица планирования

Факторы	Давление ЭКПДП	Время импульса/паузы	Сила тока	Пористость	Износостойкость
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		
№ эксп.	P, Мпа	t, сек	I, кА	П, %	$J_h$ , мкм/км ( $10^{-7}$ )
1	40	0,2	14	3	0,016
2	20	0,18	16	5	0,007
3	60	0,16	12	3	0,005
4	80	0,14	10	2	0,008
5	20	0,12	16	5	0,01
6	60	0,1	12	3	0,008
7	100	0,08	8	2	0,006
8	80	0,06	10	2	0,009
9	20	0,04	16	5	0,006
10	100	0,02	8	2	0,008
11	80	0,04	10	2	0,015
12	40	0,06	14	3	0,005
13	80	0,08	10	2	0,009
14	60	0,1	12	3	0,006
15	40	0,14	14	3	0,005
16	20	0,2	16	5	0,007

Полученная зависимость (5) проверена на адекватность, воспроизводимость и информативность результатов по критериям математической статистики. Результаты статистического анализа представлены в таблице 4.

Результаты исследований, проведенных в одинаковых условиях, проверялись на статистическую воспроизводимость по G - критерию Кохрена. Для всех регрессионных зависимостей  $G_{расч} < G_{табл}$  при  $\alpha = 0,05$ . Поэтому, степень рассеивания результатов по строкам матрицы планирования одинакова, а результаты воспроизведены.

Проверка гипотезы на адекватность полученной модели результатов эксперимента проводилась с использованием F - критерия Фишера. Для получения моделей при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$   $F_{расч} < F_{табл}$ , поэтому модель адекватно отражает результат эксперимента.

Оценка качества полученной математической модели проводилась путем определения коэффициента множественной корреляции. Коэффициент множественной корреляции R показывает величину статистической связи по уравнению множественной регрессии  $Y_n$  и начальными экспериментальными результатами. Коэффициент множественной корреляции статистически значим, то есть  $F_{расч} > F_{табл}$ . Таким образом, модель, информативная и несет полезную информацию о процессе моделируемой системы.

Для определенных факторов проведено графическое исследование их влияния на критерий оптимизации, характеризующий пористость покрытия. Визуальный анализ графиков позволяет провести анализ влияния факторов на значение функции отклика и определить то значение факторов, которое на протяжении всего времени воздействия осуществляет больший или меньший эффект. На основании полученных результатов получено наглядное представление о геометрическом образе функции отклика (рис. 1-3).

Таблица 4

## Статистическая характеристики модели

Параметры статистического анализа	Значения параметров для моделей
	$Y_1$
Анализ адекватности модели	
Остаточная дисперсия	0,212397
Дисперсия воспроизводимости	0,16875
Расчетное значения F-критерия	15,6154
Уровень значимости F-критерия для адекватности для степеней свободы.	0,05 V1 = 11 V2 = 4
Табличное значение F-критерия для адекватности	5,93581
Стандартная ошибка оценки.	0,518917
Стандартная ошибка оценки, скорректированная с учетом степеней свободы	0,89879
Модель адекватна	
Анализ информативности модели	
Доля рассеивания, что объясняется моделью	0,97835
Введено регрессоров	12
Коэффициент множественной корреляции	0,989116
Коэффициент множественной корреляции с учетом степеней свободы	0,96698
F отношения для R	16,4323
Уровень значимости F-критерия для информативности для ступеней свободы	0,05 V1 = 11 V2 = 4
Табличное значение F-критерия для информативности	5,93581
Критерии Бокса и Венца для информативности.	1
Модель информативна	

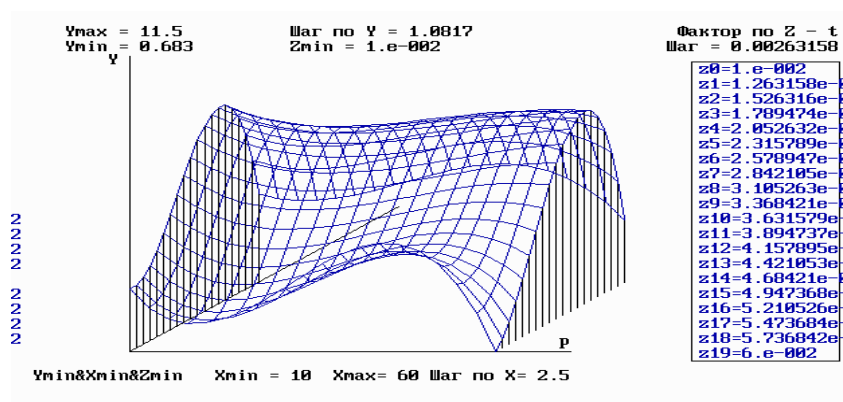


Рис. 1— Графики следования поверхности отклика  $Y_1 = f(X_1, X_2)$  в трехмерном пространстве при  $X_3 = 8$  кА

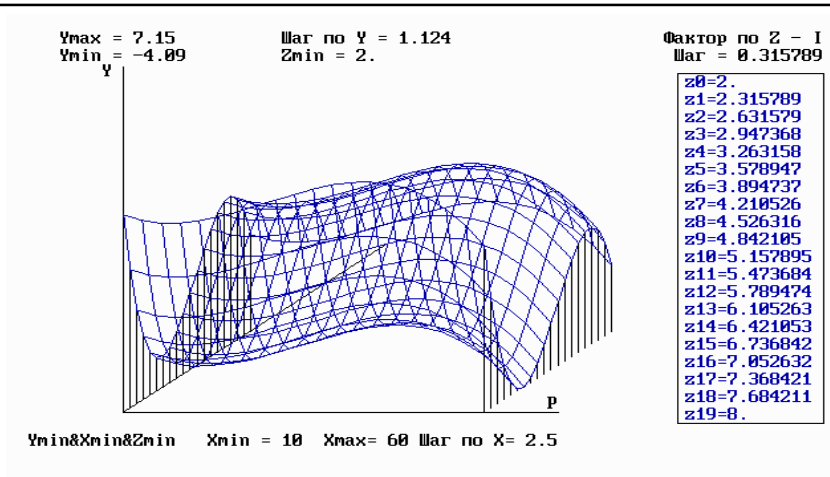


Рис. 2 – Графики следования поверхности отклика  $Y_1 = f(X_1, X_3)$  в трехмерном пространстве при  $X_2 = 0,06$  с

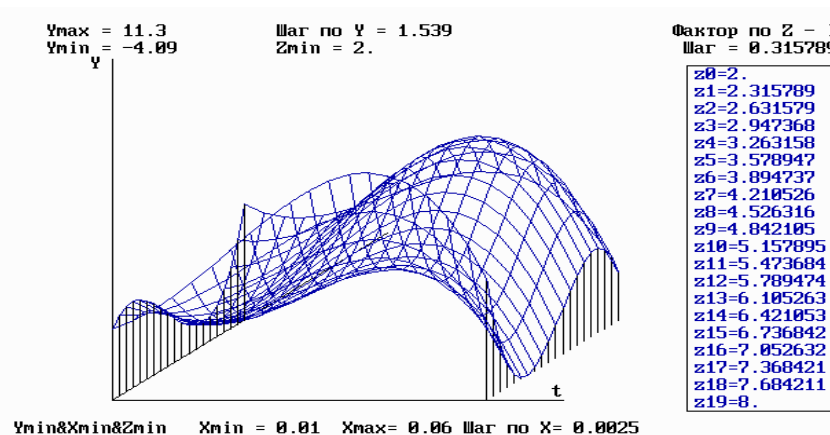


Рис. 3 – Графики следования поверхности отклика  $Y_1 = f(X_2, X_3)$  в трехмерном пространстве при  $X_1 = 60$  МПа

Результаты статистического анализа позволяют сделать вывод, что математическая модель (5) зависимости пористость покрытий от параметров ЭКПДП адекватная и информативна, результаты воспроизведены, коэффициенты  $b_0$  и  $b_i$  статистически значимы. Все это говорит о том, что математическая модель (5) адекватно описывает процесс электроконтактного припекания дискретных покрытий и ее можно использовать для анализа и выбора его оптимальных параметров.

По результатам эксперимента проведен статистический анализ и построена математическая модель (6) зависимости критерия оптимизации, характеризующей износостойкость покрытий от параметров ЭКПДП (табл. 1-3).

$$Y_2 = 0,00811228 + 0,00394767x_2x_3^2 + 0,00349501x_2^3x_3^2 + 0,00250342x_1^3x_2^2x_3^2 - 0,00381417x_1^3x_2^2x_3^3 - 0,00172934x_2^3x_3^3 + 0,000583571x_2 + 0,00135172x_2^3x_3^3 - 0,00107438x_1^3 + 0,00212148x_3^2 + 0,00132599x_2^2 - 0,00223146x_1 + 0,00162397x_3, \quad (6)$$

где  $Y_2$  – математическая модель в кодированных значениях для износостойкости покрытия.

Формулы перехода от кодированных значений факторов к натуральным:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 0,0363636 (X_1 - 32,5); \\
 x_1^2 &= 1,88514(X_1^2 - 0,114165X_1 - 0,355372); \\
 x_1^3 &= 4,88078(X_1^3 - 0,225599X_1^2 - 0,645588X_1 + 0,0396005); \\
 x_2 &= 39,0244(X_2 - 0,035625); \\
 x_2^2 &= 1,61971(X_2^2 - 0,0355966X_2 - 0,418203); \\
 x_2^3 &= 3,71976(X_2^3 + 0,0382814X_2^2 - 0,76032X_2 - 0,030896); \\
 x_3 &= 0,326531 (X_3 - 4,9375); \\
 x_3^2 &= 1,68391(X_3^2 - 0,055512X_3 - 0,379425); \\
 x_3^3 &= 4,43393(X_3^3 - 0,035212X_3^2 - 0,736017X_3 - 0,00770233).
 \end{aligned}$$

Расчет модели осуществлялся с помощью ППП ПРИАМ [7]. В качестве исходных данных использовались матрица планирования (табл. 3) и результаты исследований, проведенные при одних и тех же условиях. Полученная математическая модель (6) зависимости критерия оптимизации, характеризующей износостойкость покрытий от параметров ЭКПДП (табл. 1-3), проверена на адекватность, воспроизводимость и информативность результатов по критериям математической статистики. Результаты статистического анализа представлены в таблице 5.

Результаты исследований, проведенных в одинаковых условиях, проверялись на статистическую воспроизводимость по G - критерию Кохрена. Для всех регрессионных зависимостей  $G_{расч} < G_{табл}$  при  $\alpha = 0,05$ . Поэтому, степень рассеивания результатов по строкам матрицы планирования одинакова, а результаты воспроизведены.

Проверка гипотезы на адекватность полученной модели результатов эксперимента проводилась с использованием F - критерия Фишера. Для получения моделей при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$   $F_{расч} < F_{табл}$ , поэтому модель адекватно отражает результат эксперимента.

Оценка качества полученной математической модели (6) проводилась путем определения коэффициента множественной корреляции. Коэффициент множественной корреляции R показывает величину статистической связи по уравнению множественной регрессии  $Y_n$  и начальными экспериментальными результатами. В полученной математической модели коэффициенты множественной корреляции статистически значимы, то есть  $F_{расч} > F_{табл}$ , при принятом уровне значимости. Таким образом, модель, информативная и несет полезную информацию о процессе моделируемой системы.

Таблица 5

## Статистическая характеристика модели

Параметры статистического анализа	Значения параметров для моделей
	$Y_2$
Анализ адекватности модели	
Остаточная дисперсия	$3,33725 \cdot 10^{-7}$
Дисперсия воспроизводимости	$2,64063 \cdot 10^{-8}$
Расчетное значения F-критерия	31,9125
Уровень значимости F-критерия для адекватности	0,05
для степеней свободы.	$V_1 = 12$ $V_2 = 3$
Табличное значение F-критерия для адекватности	8,74464
Стандартная ошибка оценки.	0,000578436
Стандартная ошибка оценки, скорректированная с учетом степеней свободы	0,00112014
Модель адекватна	
Анализ информативности модели	
Доля рассеивания, что объясняется моделью	0,993717
Введено регрессоров	13
Коэффициент множественной корреляции	0,996853
Коэффициент множественной корреляции, с учетом степеней свободы	0,988148
F отношения для R	39,5377
Уровень значимости F-критерия для информативности для ступеней свободы	0,05
	$V_1 = 12$ $V_2 = 3$
Табличное значение F-критерия для информативности	8,74464
Критерии Бокса и Венца для информативности.	1
Модель информативна	

Для определенных факторов проведено графическое исследование их влияния на критерий оптимизации, характеризующий износостойкость покрытия. Визуальный анализ графиков позволяет провести детальный анализ влияния факторов на значение функции отклика и определить то значение факторов, которое на протяжении всего времени воздействия осуществляет значительный эффект или нет. На основе полученных результатов можно получить наглядное представление о геометрическом образе функции отклика построением соответствующей геометрической поверхности (рис.4 -6).

Результаты статистического анализа позволяют сделать вывод, что математическая модель (6) зависимости критерия оптимизации, характеризующей износостойкость покрытий от параметров ЭКПДП (табл. 1-3) адекватная и информативна, результаты воспроизведены, коэффициенты  $b_0$  и  $b_i$  ста-



статистически значимы (табл. 5). Все это говорит о том, что математическая модель (6) адекватно описывает процесс ЭКПДП и ее можно использовать для анализа и выбора его оптимальных параметров.

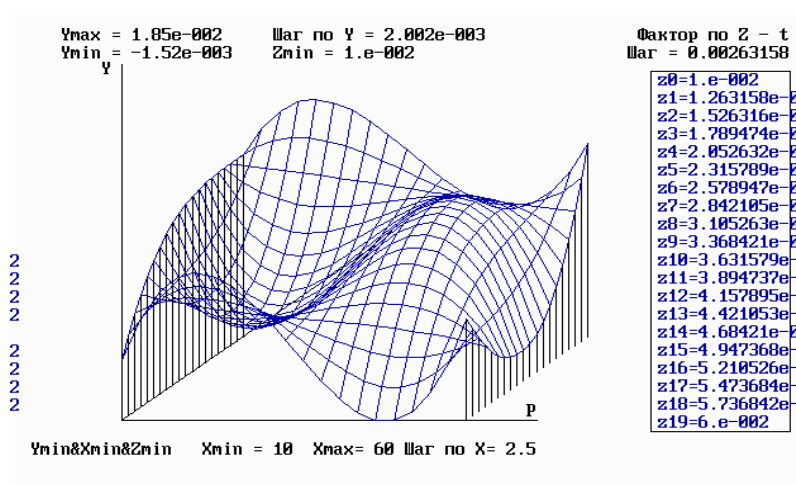


Рис. 4 - График исследования поверхности отклика  $Y_2 = f(X_1, X_2)$  в трехмерном пространстве при  $P_{\min} = 20$  МПа,  $P_{\max} = 100$  МПа

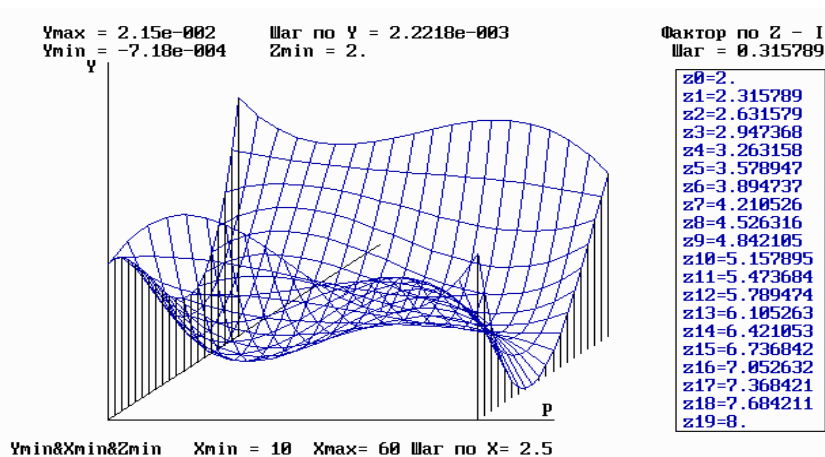


Рис. 5 - График исследования поверхности отклика  $Y_2 = f(X_1, X_3)$  в трехмерном пространстве при  $X_2 = 0,06$  с

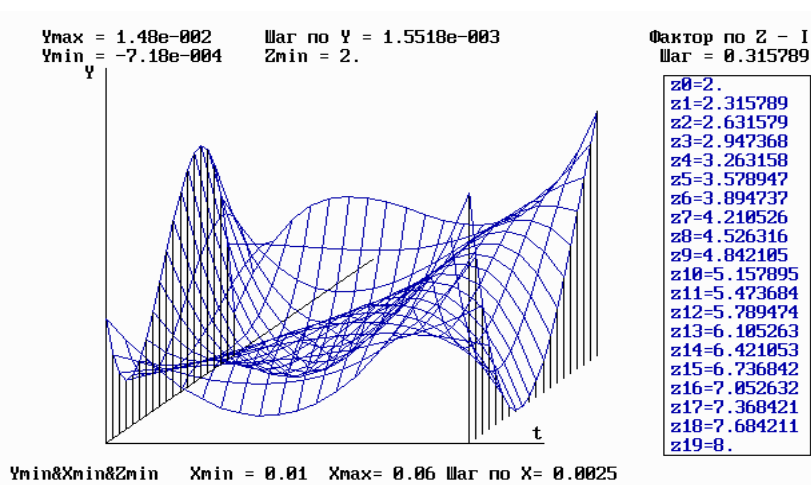


Рис. 6 - График исследования поверхности отклика  $Y_2 = f(X_2, X_3)$  в трехмерном пространстве при  $X_1 = 60$  МПа

## Выводы

Таким образом, зависимость пористости и износостойкости покрытий дискретной структуры от параметров ЭКПДП (давления, силы тока, времени импульсов тока и пауз) можно представить уравнениями регрессии (5) – (6). Анализируя уравнения (5) и (6) следует отметить, что наибольшее влияние на пористость и износостойкость покрытий оказывает взаимодействие всех трех исследуемых факторов ЭКПДП: давления, силы тока, времени импульсов тока и пауз. Почти в равной степени на износостойкость влияют давление и ток, на пористость – величина тока и эффект взаимодействия тока и давления.

На основании проведенных исследований определены оптимальные режимы ЭКПДП из сталей Св-08 и 40Х13, которые отличаются. Покрытие из сталей Св-08 допускают ЭКПДП на следующих режимах: ток нагрева  $I = 3,0$  кА, давление  $P = 15$  МПа, время импульсов-пауз  $t = 0,02$  с., а из стали 40Х13:  $I = 6,0$  кА,  $P = 30$  МПа,  $t = 0,04$  с. Оптимальный режим ЭКПДП должен обеспечивать аустенитно-мартенситное превращение в материале покрытия и исключать его расплавления.

## Литература

1. Ляшенко Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры /Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Технологические системы – 2001.– № 4. - С. 17-25.
2. Ляшенко Б.А. Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, О.А. Розенберг, В.В. Ермолаев и др. // Тяжелое машиностроение – 2001. - №2. – С. 21-23.
3. Лопата Л.А. Получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием / Л.А. Лопата, Б.А. Ляшенко, В.И. Калиниченко, Ю.В. Волков, Т.В. Ворона // Проблемы трения и изнашивания: науч. - техн. сб. – Киев: НАУ, 2009. – № 51. – С. 139–148.
4. Ляшенко Б.А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием / Б.А. Ляшенко, Ю.В. Волков, Е.К. Соловых, Л.А. Лопата // Проблемы трения и изнашивания. – 2015. – № 2(67). – С. 110–126.
5. Ляшенко Б.А. Оптимизация дискретных структур электроискровых покрытий / Б.А. Ляшенко [и др.] // Артиллерийское и стрелковое вооружение: междунар. науч.-техн. сб. – Киев, 2004. – Т. 4(13). – С. 30–34.
6. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. – М.: Советское радио, 1958. – 214 с.
7. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С.Г. Радченко // Навчальний посібник. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 88 с.
8. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Методичні вказівки до лабораторно-комп’ютерного практикуму для студентів спеціальності «Технологія машинобудування» усіх форм навчання / Уклад.: С.М.Лапач, С.Г.Радченко, Р.В. Галайда. – К.: НГУУ „КПІ”, 2007. – 116 с.

Поступила в редакцію 10.02.2017

Solovykh Y., Volkov Yu., Vorona T., Nikolaychuk V., Lopata L., Dudan A. **Determining the optimal timang of the electrocontact sintering diskrete coating**

On the basis of experimental studies and using mathematical modeling comprehensive assessment of the impact of major technological parameters (pressure, current, speed of sintering) of the electrocontact sintering process of powders on physical and mechanical properties of the coatings (adhesion strength and durability) is given. Multivariate experiment with a certain variation of these parameters allowed us to estimate the impact of each of them on the properties of the coatings and to identify the effects of the interaction. It is concluded that in order to improve the physical and mechanical properties of the resulting coatings is advisable to use all three complex technological parameters of the process.

**Keywords:** diskrete coating, electrocontact sintering, optimization, durability, porosity, technological parameters

### References

1. Ljashenko B.A. Uprochnjajushhie pokrytija diskretnoj struktury /B.A. Ljashenko, A.Ja. Movshovich, A.I. Dolmatov // Tehnologicheskie sistemy – 2001.– No 4. - P. 17-25.
2. Ljashenko B.A. Vosstanovlenie detalej mashin differencial'nymi pokrytijami diskretnoj struktury / B.A. Ljashenko, O.A. Rozenberg, V.V. Ermolaev i dr. // Tjzheloe mashinostroenie – 2001. - №2. – P. 21-23.
3. Lopata L.A. Poluchenie iznosostojkih diskretnyh pokrytij jelektrokontaktnym pripekaniem / L.A. Lopata, B.A. Ljashenko, V.I. Kalinichenko, Ju.V. Volkov, T.V. Vorona // Problemy trenija i iznashivanija: nauch. - tehn. sb. – Kiev: NAU, 2009. – № 51. – P. 139–148.
4. Ljashenko B.A. Povyshenie iznosostojkosti detalej sudovyh mashin i mehanizmov pokrytijami diskretnoj struktury. Tehnologicheskoe obespechenie pokrytij diskretnoj struktury jelektrokontaktnym pripekaniem / B.A. Ljashenko, Ju.V. Volkov, E.K. Solovyh, L.A. Lopata // Problemy trenija i iznashivanija. – 2015. – No 2(67). – P. 110–126.
5. Ljashenko B.A. Optimizacija diskretnyh struktur jelektroiskrovyh pokrytij / B.A. Ljashenko [i dr.] // Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie: mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Kiev, 2004. – T. 4(13). – P. 30–34.
6. Viner N. Kibernetika ili upravlenie i svjaz' v zhivotnom i mashine. – M.: Sovetskoe radio, 1958. – 214 p.
7. Radchenko P.G. Matematichne modeljuvannja ta optimizacija tehnologichnih sistem / P.G. Radchenko // Navchal'nij posibnik. – K.: IVC “Politehnika”, 2001. – 88 p.
8. Matematichne modeljuvannja ta optimizacija tehnologichnih sistem: Metodichni. vkazivki do laboratorno-komp'jutornogo praktikumu dlja studentiv special'nosti «Tehnologija mashinobuduvannja» usih form navchannja / Uklad.: P.M.Lapach, P.G.Radchenko, R.V. Galajda. – K.: NTUU „KPI”, 2007. – 116 p.