

УДК 669.017

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕНОВАЦИИ ВКЛАДЫШЕЙ ПОДШИПНИКОВ

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
ГЛУШКОВА Д. Б.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.,  
КОСТИНА Л. Л.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра технологии металлов и материаловедения, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, (ХНАДУ), ул. Петровского, 25, 61002, г. Харьков, Украина, тел. +38-097-4811593, e-mail: [dianaborisovna@gmail.com](mailto:dianaborisovna@gmail.com)

<sup>3</sup> Кафедра технологии металлов и материаловедения, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, (ХНАДУ), ул. Петровского, 25, 61002, г. Харьков, Украина, тел. +38-0661508972, e-mail: [fpk@khadi.kharkov.ua](mailto:fpk@khadi.kharkov.ua)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Рассмотрены вопросы восстановления вкладышей подшипников методами вакуум-плазменного напыления. Детали и узлы с нанесенным вакуум-плазменным покрытием по мере износа можно неоднократно восстанавливать путем повторного нанесения покрытий, что заметно сокращает затраты на ремонт оборудования, во много раз уменьшает расход материала для изготовления новых деталей. Необходим поиск оптимальных параметров вакуум-плазменного напыления. **Анализ публикаций.** Наиболее эффективным для повышения износостойкости изделия является создание многослойного покрытия. Процесс вакуум-плазменного нанесения покрытия на вкладыши ранее не применяли, он в литературных источниках не описан. **Цели и задачи.** Необходимо с помощью математического планирования выбрать те параметры процесса, при которых образуется поверхностный слой с требуемыми свойствами. **Изложение материала.** В работе выбраны параметры вакуум-плазменного напыления на основе процессов математического моделирования. Решены следующие задачи: выбор параметров оптимизации; расчет и получение зависимости качества покрытия от параметров технологического процесса напыления; выбор областей оптимальных параметров технологического процесса для получения качественных покрытий. **Выводы.** Максимальная стойкость вкладышей подшипников может быть получена при твердости материалов 45 HRC, шероховатости поверхности вкладыша, на которую наносится покрытие,  $R_a = 0,16$ , и толщине наносимого покрытия 45 мкм.

**Ключевые слова:** вкладыши подшипников, вакуум-плазменное напыление, математическое планирование, многофакторный эксперимент, оптимизация

## ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РЕНОВАЦІЇ ВКЛАДИШІВ ПІДШИПНИКІВ

Большаков В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
Глушкова Д. Б.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.,  
Костіна Л. Л.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра технології металів та металознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), вул. Петровського, 25, 61002, м. Харків, Україна, тел. +38-097-4811593, e-mail: [dianaborisovna@gmail.com](mailto:dianaborisovna@gmail.com)

<sup>3</sup> Кафедра технології металів та металознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), вул. Петровського, 25, 61002, м. Харків, Україна, тел. +38-0661508972, e-mail: [fpk@khadi.kharkov.ua](mailto:fpk@khadi.kharkov.ua)

**Анотація. Постановка проблеми.** Розглянуто питання відновлення вкладишів підшипників методами вакуум-плазмового напылення. Деталі та вузли з нанесеним вакуум-плазмовим покриттям у міру зношування можна неодноразово відновлювати шляхом повторного нанесення покриттів, що значно скорочує витрати на ремонт обладнання, в багато разів зменшує витрати матеріалу для виготовлення нових деталей. Необхідний пошук оптимальних параметрів вакуум-плазмового напылення. **Аналіз публікацій.** Найбільш ефективно для підвищення зносостійкості виробу утворення багатшарового покриття. Процес вакуум-плазмового нанесення покриття на вкладиші раніше не застосовували, він у літературних джерелах не описаний. **Мета та завдання.** Необхідно за допомогою математичного планування вибрати ті параметри процесу, при яких утворюється поверхневий шар із необхідними властивостями. **Виклад матеріалу.** Вибрано параметри вакуум-плазмового напылення на основі процесів математичного моделювання. Вирішено такі питання: вибір параметрів оптимізації; розрахунок і отримання залежності якості покриття від параметрів технологічного процесу напылення; вибір областей оптимальних параметрів технологічного процесу для отримання якісних покриттів.

**Висновки.** Максимальна стійкість вкладишів підшипників може бути отримана при твердості матеріалів 45 HRC, шорсткості поверхні вкладиша, на яку наносять покриття,  $R_a = 0,16$ , і товщині покриття, котре наносять, 45 мкм.

*Ключові слова:* вкладиші підшипників, вакуум-плазмове напилення, математичне планування, багатофакторний експеримент, оптимізація

## SELECTING OPTIMUM MODES OF BEARING PADS RESTORATION

*BOLSHAKOV V. I.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,  
GLUSHKOVA D. B.<sup>2\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.,  
KOSTINA L. L.<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernishevskogo Str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Technology of Metals and Materials of State Higher Education Establishment, Kharkiv National Automobile and Highway University, (KhNAHU), 25, Petrovskoho Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38-097-4811593, e-mail: [dianaborisovna@gmail.com](mailto:dianaborisovna@gmail.com)

<sup>3</sup> Technology of Metals and Materials of State Higher Education Establishment, Kharkiv National Automobile and Highway University, (KhNAHU), 25, Petrovskoho Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38-0661508972, e-mail: [fpk@khadi.kharkov.ua](mailto:fpk@khadi.kharkov.ua)

**Abstract. Problem formulation.** The questions of bearing pads restoration by vacuum-plasma spraying are considered. Parts and components coated with vacuum-plasma can be repeatedly restored by recoating while they wear out, which significantly reduces the cost of equipment repair, considerably reduces the consumption of materials for manufacture of new parts. Need search for optimal parameters vacuum-plasma spraying. **Content analysis.** The most effective way to improve the wear resistance of the product is to create a multilayer coating. The process of vacuum-plasma coating of pads was not previously used; it is not described in the literature sources. **Goals and tasks set.** So it is necessary with the help of mathematical planning to select those process parameters under which there is formed a surface layer with desired properties. **Statement of the material.** In the given work there were selected the parameters of vacuum-plasma spraying process on the basis of mathematical modeling. The following tasks are solved: selection of optimization parameters; calculation and obtaining of quality dependence of the coating on the parameters of the technological process of spraying; selection of areas of the optimum technological spraying process parameters to produce high-quality coatings. **Conclusions.** Maximum resistance of bearings pads can be obtained with hardness of materials 45 HRC, the surface roughness of the pad to be coated,  $R_a = 0.16$  and the coating thickness of 45 microns.

*Keywords:* bearing pads, vacuum-plasma, spraying, mathematical planning, multifactor experiment, optimization

### Постановка проблеми

В комплексі сучасних проблем підвищення надійності і довговечності машин особе місце займає питання зносостійкості деталей. Недостатня зносостійкість матеріалів лімітує ріст продуктивності машин і термів їх експлуатації, збільшує витрати на ремонт і запасні частини. Довговечність значущого числа деталей визначається тривалістю одного лише міжремонтного пробігу. До таких деталей належать, зокрема, дорогі коренні і шатунні вкладиші колінчатих валів дизелів, які при ремонтах повністю заміняють новими.

Далеко не завжди потрібний комплекс властивостей виробів може бути сформований традиційними методами термічної і хімічної обробки [1–4]. Збільшити термін служби як коренних, так і шатунних вкладишів можливо шляхом їх реставрації. Все частіше для рішення задачі підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів привабливими є нові методи поверхневого упрочнення і створення особливих властивостей матеріалів, зокрема, вакуум-плазменного напилення [5–7]. Їх використовують в

різних галузях машинобудування для захисту поверхні деталей і вузлів машин від абразивного зносу, ерозійного, корозійного і інших впливів середовища. Крім того, по мірі зносу ці деталі і вузли можна неодноразово відновлювати шляхом повторного нанесення покриття, що помітно скорочує витрати на ремонт обладнання, воно багато разів зменшує витрати матеріалу для виготовлення нових деталей. І хоча розроблені основні положення загальної теорії утворення покриття [8], залишається проблема вибору оптимального методу напилення для кожного конкретного виробу.

### Аналіз публікацій

Найпростіші закономірності формування структури покриття характерні для однокомпонентних покриттів. Для цілей підвищення зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості найбільш результативно використання багатокомпонентних покриттів [9]. Очевидно, що для таких сплавів не завжди можна теоретично передбачити структуру і властивості покриття. Розробка технологічного процесу напилення конкретних матеріалів потребує широкого експериментального вивчення їх структури і

свойств после напыления, возможности изменения их последующей термической обработкой, изменением структуры и свойств после эксплуатации. Однако технологий восстановления в настоящее время просто не существует. Попытки применить для восстановления вкладышей гальванический метод, метод центробежного литья и пр. положительных результатов не дали [10; 11].

В связи с изложенным, а также с учетом дороговизны шатунных и коренных вкладышей коленчатых валов, дефицитности (а то и отсутствия) их в последнее время, разработка высокопродуктивной технологии их изготовления и восстановления представляется чрезвычайно важной и актуальной.

#### Цели и задачи

Поскольку процесс вакуум-плазменного нанесения покрытия на вкладыши ранее не применяли, он в литературных источниках не описан, поэтому необходимо с помощью математического планирования выбрать те параметры процесса, при которых образуется поверхностный слой с требуемыми свойствами.

Целью работы был выбор параметров вакуум-плазменного напыления на основе процессов математического моделирования. В ходе работы решены следующие задачи: выбор параметров оптимизации; расчет и получение зависимости качества покрытия от параметров технологического процесса напыления; выбор областей оптимальных параметров технологического процесса для получения качественных покрытий.

#### Изложение материала

Процесс формирования покрытия должен состоять из двух стадий: ионной бомбардировки поверхности и последующей обработки – нанесения многослойного покрытия. Необходима оптимизация трех параметров обработки: температуры, времени осаждения и концентрации наносимого элемента. Для этого был применен ортогональный композиционный план второго порядка. Уровни варьирования факторов для реализации предложенного плана, а также связь между кодовыми и натуральными значениями факторов (табл. 1) выбирали на основе рекомендаций, изложенных в [12; 13].

Таблица 1

**Уровни варьирования и связь кодовых обозначений факторов с натуральными значениями / Levels of variation and connection of code words of factors with natural values**

Уровни	Кодовые обозначения			Натуральные значения		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau$ (мин)	$c$ (г)
Верхняя звездная точка	+1,215	+1,215	+1,215	1082	47	29,8
Верхний	+1	+1	+1	900	35	18,7
Нулевой	0	0	0	650	25	13,6
Нижний	-1	-1	-1	400	15	8,5
Нижняя звездная точка	-1,215	-1,215	-1,215	220	3	7,5

Таблица 2

**Матрица ортогонального плана и результаты экспериментов / Matrix of the orthogonal plan and the results of experiments**

Номер опыта	Кодовые обозначения			Натуральные значения			У1 (износ $\mu_2$ )	У2 (коэф. трения)
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau$ (мин)	$c$ (г)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-1	-1	-2	400	15	8,5	125	0,28
2	-1	-1	+1	400	15	18,5	65	0,29
3	-1	+1	-1	400	35	8,5	78	0,27
4	-1	+1	+1	400	35	18,7	94	0,30
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	+1	-1	-1	700	15	8,5	92	0,26
6	+1	-1	+1	700	15	18,7	56	0,27'

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	+1	+1	-1	700	35	8,5	68	0,28
8	+1	+1	+1	700	35	18,7	104	0,28
9	0	0	-1,215	650	25	7,5	85	0,21
10	0	0	+1,215	650	25	29,8	48	0,19
11	0	-1,215	0	650	3	13,6	72	0,20
12	0	+1,215	0	650	47	13,6	82	0,22
13	-1,215	0	0	220	25	13,6	89	0,26
14	+1,215	0	0	900	25	13,6	92	0,24
15	0	0	0	650	25	13,6	44	0,29

Напыление вкладышей производили на установке «Булат» согласно схеме (рис. 1).

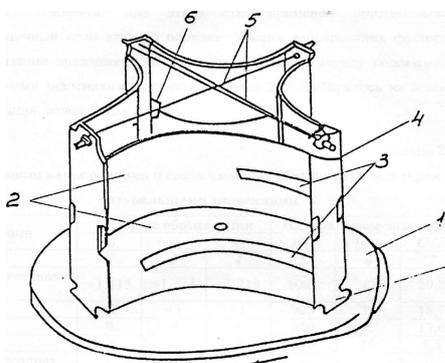


Рис. 1. Схема крепления вкладышей:  
1 – вращающийся стол; 2 – вкладыши;  
3 – накладки; 4 – пластины;  
5, 6 – крепежные устройства /  
Fig. 1. Schematic mounting inserts:  
1 – rotary table; 2 – pads; 3 – lining;  
4 – plates; 5, 6 – fixing devices

После проведения опытов согласно матрице ортогонального плана второго порядка были получены в качестве параметров функции отклика значения износа и значения коэффициентов.

Значения функции отклика в каждом опыте оценивали средним значением по ряду измерений. После проверки на однородность дисперсий полученного ряда измерений по критерию Кохрена среднее значение ряда использовались для расчета функции отклика.

Последовательность проведения опытов матрицы плана определялась таблицей случайных чисел. С помощью расчетов на ПЭВМ были получены остаточные уравнения регрессии, адекватно описывающие экспериментальные данные.

Коэффициенты полученного уравнения регрессии проверяли на значимость по критерию Стьюдента, а также на адекватность

экспериментальным данным полученной модели по критерию Фишера. Порядок и ход вычислений приведены.

Полученные в результате этого остаточные уравнения регрессии имеют вид:

$$Y_1 = 63,3 + 1,27X_1 + 1,66X_2 - 8,57X_3 + 5,25X_1X_2 +$$
(1)

$$+ 5,5X_1X_3 + 18,5X_2X_3 + 8,06X_1^2 + 10,77X_2^2 + 2,3X_3^2$$

$$Y_2 = 0,51 + 0,2X_1 + 0,005X_2 - 0,002X_3 + 0,004X_1X_2 + 0,004X_1X_3 + 0,001X_2X_3 + 0,34X_1^2 + 0,27X_2^2 + 0,27X_3^2$$
(2)

Для более наглядной характеристики полученных уравнений необходим переход от кодовых обозначений к натуральным их значениям. При переходе от кодовых значений в натуральные согласно методике [12; 13] использовали соотношения 3, 4:

$$x_1 = \frac{t - y_0}{y_{интер}}; \quad x_1 = \frac{\tau - y'_0}{y'_{интер}}; \quad x_1 = \frac{c - y''}{y''_{интер}}$$
(3)

$$x_1 = \frac{t - 650}{250}; \quad x_1 = \frac{\tau - 25}{10}; \quad x_1 = \frac{c - 18,6}{5,1}$$
(4)

Эти значения  $X_1, X_2, X_3$  подставляли в уравнение (2) и после выполнения вычислительных операций связь технологических параметров процесса со свойствами поверхностного слоя получила вид:

$$U = 407 - 0,28t - 12,2\tau + 0,02t\tau + 0,04tc + 0,0001t^2 + 0,1\tau^2 + 0,09c^2$$
(5)

$$f = 2,77 - 0,27t - 0,14\tau + 0,27c + 2 \cdot 10^{-5}t\tau + 3 \cdot 10^{-5}tc + 2 \cdot 10^{-4}c\tau + 5 \cdot 10^{-5}t^2 + 3 \cdot 10^{-2}\tau^2 - 0,01c^2$$
(6)

Рассмотрение графической интерпретации уравнений (5) и (6) показало, что в уравнении (5) все коэффициенты при аргументах  $t, \tau, t\tau, tc, c\tau, t^2, \tau^2$ , и  $c^2$  являются значимыми, а в уравнении (6) коэффициенты при аргументах  $t\tau, tc, c\tau$  –

малозначимыми, поэтому уравнения (5) и (6) могут быть упрощены за счет отбрасывания малозначимых факторов. В итоге они получили вид 7, 8:

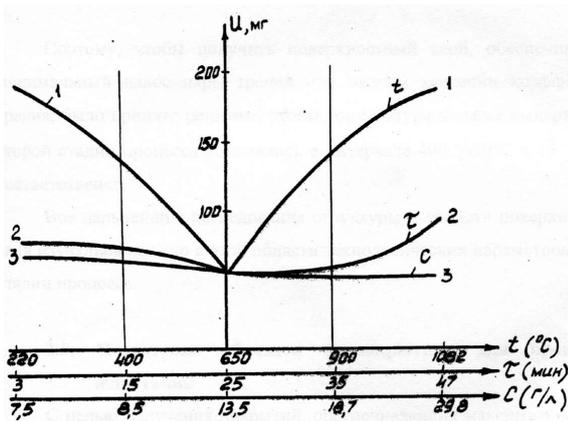
$$U = 407 - 0,28t - 12,2\tau + 0,02t\tau + \quad (7)$$

$$+ 0,04tc + 0,0001t^2 + 0,1\tau^2 + 0,09c^2$$

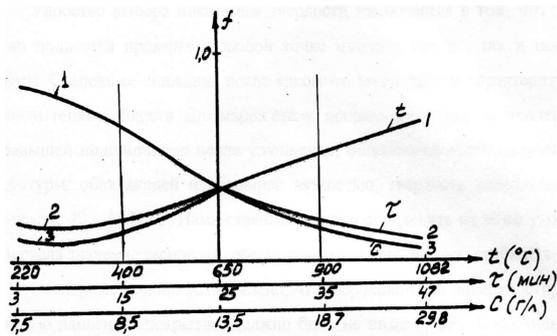
$$f = 2,77 - 0,27t - 0,14\tau + 0,27c + \quad (8)$$

$$+ 5 \cdot 10^{-5}t^2 + 3 \cdot 10^{-2}\tau^2 - 0,01c^2.$$

Ход кривой 3, которая соответствует изменению концентрации конденсата, имеет такой же характер, как и для кривой 2, соответствующей времени насыщения (рис. 2).



a



б (b)

Рис. 2. Изменение кривых износа и коэффициента трения в зависимости от технологических параметров: а – износ; б – коэффициент трения /  
Fig. 2. The change of curves of wear and the friction coefficient, depending on technological parameters: a – wear; b – coefficient of friction

Следовательно, на износ и коэффициент трения образованного поверхностного слоя концентрация конденсата и время насыщения в этой среде имеют идентичное влияние.

Изменение кривых износа и коэффициента трения в зависимости от технологических параметров процесса показало, что наименьший износ наблюдается при температуре второй стадии, равной 650 °С, и времени выдержки, равном 25 минут (рис. 2 а). Однако при этих параметрах процесса значения коэффициента трения не являются минимальными (рис. 2 б).

Наименьшие значения коэффициента трения соответствуют иным значениям параметров второй стадии: температура 400 °С и время выдержки 15 мин (рис. 2 б). В то же время при этих значениях параметров износ опытных образцов был выше (рис. 2 а), чем после обработки при 650 °С и выдержке 25 мин.

Все дальнейшие исследования структуры и свойств поверхностного слоя изучали именно в этой области технологических параметров второй стадии процесса.

С целью получения покрытий, обеспечивающих максимальный срок эксплуатации вкладышей, были определены оптимальные значения твердости и шероховатости поверхности вкладышей, на которую наносится покрытие, в соответствии с толщиной наносимого покрытия.

Удобство выбора в качестве показателя твердости заключается в том, что она легко поддается проверке в любой точке изделия, как до, так и после работы. Степень ее снижения после какого-либо этапа работы характеризует уровень теплостойкости. Для марок стали, используемых для изготовления вкладышей подшипников после улучшения, обеспечивающего получение структуры, обладающей наибольшей вязкостью, твердость колеблется в интервале 40...45 HRC. Ставили задачу определить из этого узкого интервала значение твердости, обеспечивающее наибольшую стойкость.

Экспериментально установлено, что шероховатость поверхности, на которую наносят покрытие, должна быть не ниже 0,48R<sub>z</sub>. В противном случае наблюдается отслаивание покрытия.

Поэтому необходимо определить шероховатость обрабатываемой поверхности, обеспечивающую наилучшую схватываемость покрытия с основным материалом. Толщина наносимого покрытия изменяется от 40 до 45 мкм, что соответствует требованиям ГОСТа для антифрикционного слоя. Оптимизируемым параметром являлся максимальный срок эксплуатации вкладышей V. В соответствии с принятой методикой [14] составлена матрица планирования эксперимента, ортогональный план второго порядка (табл. 3). Получена функция регрессии, описывающая процесс в виде полинома второй степени (9).

Методом наименьших квадратов определены коэффициенты регрессии. Проверка значимости коэффициентов проведена по критерию Стьюдента, согласно которому незначимыми следует считать все коэффициенты более 0,380.

Уравнение интерповерхности приобретает вид:

$$V = 15,32 + 1,1X_1 + 1,65X_2 + 2,406X_3 + \quad (9)$$

$$+ 0,25X_1X_2 + 0,25X_2X_3 - 1,76X_1^2 -$$

$$- 0,41_2^2 + 0,267_3^2.$$

$$V = 15,32 + 1,1X_1 + 1,65X_2 + 2,406X_3 - 1,76X_1^2 - 0,41X_2^2 \quad (10)$$

Таблица 3

Ортогональный план 2-го порядка / The orthogonal plan of the 2nd order

№	Твердость HRC, $X_1$	$\delta$ , мкм $X_2$	Ra мкм $X_3$	У циклов
1	-1	-1	-1	8,0
2	-1	-1	+1	9,0
3	-1	+1	-1	10
4	-1	+1	+1	12
5	+1	-1	-1	15
6	+1	-1	+1	16
7	+1	+1	-1	18
8	+1	+1	+1	20
9	-1,214	0	0	10
10	+1,214	0	0	15
11	0	-1,214	0	12
12	0	+1,214	0	17
13	0	0	-1,214	17
14	0	0	+1,214	14
15	0	0	0	16

Сечение интерповерхности отклика описывается:

1. при  $X_1 = 46$  уравнением 11

В области  $3 \leq X_2 \leq 6$ ;  $0,16 \leq X_3 \leq 0,514$  уравнение задает часть поверхности параболы цилиндра (рис. 3 а).

2. при  $X_2 = 5$  уравнением 12.

В области  $41 \leq X_1 \leq 46$ ;  $0,16 \leq X_3 \leq 0,514$  уравнение задает часть поверхности параболы цилиндра (рис. 3 б).

3. при  $X_3 = 0,16$

В области  $41 \leq X_1 \leq 46$ ;  $3 \leq X_2 \leq 6$  уравнение задает часть поверхности эллиптического параболоида (рис. 3 в).

$$Y = -3499,18 + 1,65X_2 + 2,406X_3 - 0,41X_2^2 \quad (11)$$

$$V = 13,32 + 1,1X_1 + 2,406X_3 - 1,76X_1^2 \quad (12)$$

$$V = 15,706 + 1,1X_1 + 1,65X_2 - 1,76X_1^2 - 0,41X_2^2 \quad (13)$$

Значения  $X_1 = 45$ ;  $X_2 = 45$ ;  $X_3 = 0,16$  соответствуют уровню наибольшей стойкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Криштал М. А. Механизм диффузии в железных сплавах / М. А. Криштал. – Москва : Metallurgiya, 1972. – 398 с.

M. Krishtal. *Mehanizm diffuzii v zheleznykh splavakh* [Mechanism of diffusion in iron alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1972. 398 p. (in Russian).

2. Дружинин Л. К. Получение покрытий высокотемпературным распылением / Л. К. Дружинин, В. В. Кудинов – Москва : Атомиздат, 1973. – 759 с.

L. Druzhinin, V. Kudinov. *Poluchenie pokrytii visokotemperaturnim raspileniem* [Coating of parts by high-

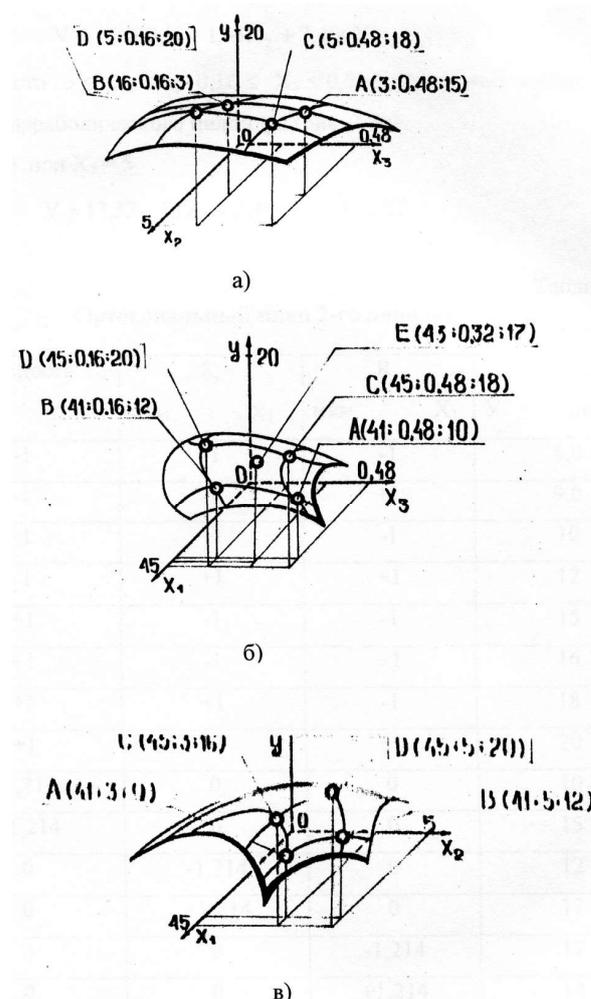


Рис. 3. Сечение гиперповерхности отклика / Fig. 3. Cross-section of the hypersurface response

Вывод

Максимальная стойкость вкладышей подшипников может быть получена при твердости материалов 45 HRC, шероховатости поверхности вкладыша, на которую наносится покрытие,  $R_a = 0,16$ , и толщине наносимого покрытия 45 мкм.

temperature spraying]. Moscow : Atomizdat , 1973. 759 p. (in Russian).

3. Chen H. C., Pfender E. Microstructure of plasma sprayed Ni–Al alloy Coating on mild Steel. *Thin Solids Films*. 1996. Vol. 280, no. 1–2. Pp. 188–198. (in English).

4. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва : Физматлит, 2005. – 426 с.

A. I. Gusev. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotehnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2005. 426 p. (in Russian).

5. Баев А. С. Повышение сопротивления усталости установленных деталей судовых дизелей /

А. С. Баев // Судоремонт флота рыбной промышленности. – 1986. – № 62. – С. 47–49.

Баев А. *Povishenie soprotivleniya ustalosti ustanovlennih detalei sudovih dizelei* [Increase of resistance to fatigue of ship diesel engines parts set]. Shipmaintenance of fish industry fleet. 1986. No. 62. Pp. 47–49. (in Russian).

6. Kitahara Sh. Some contributions on adhesive mechanism and composition of boundary between sprayed coating and substrate. *WeldSoc.* 1973. Vol. 42, no. 2. Pp. 91–99. (in English).

7. Андреев А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, В. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», 2005. – 235 с.

Andreev A. A., Sablev V. P., Shulaev V. M., Grigor'ev S. N. *Vakuumno-dugovye ustrojstva i pokrytiya* [Vacuum arc devices and coatings]. Har'kov : NNC «HFTI» Publ., 2005. 235 p. (in Russian).

<http://www.twirpx.com/file/1472331/>

8. Борисенко В. Е. Наноматериалы и нанотехнологии / В. Е. Борисенко, Н. К. Толочко. – Минск : ИЦ БГУ, 2008. – 375 с.

Borisenko V. Ye., Tolochko N. K. *Nanomaterialy i nanotehnologii* [Nanomaterial and nanotechnology]. Minsk : IC BGU Publ., 2008, 375 p. (in Russian).

9. Андриевский Р. А. Наноматериалы : концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Рос. хим. журнал. – 2002. – С. 50–56.

Andrievskiy R. A. *Nanomaterialy : koncepcija i sovremennye problemy* [Nanomaterials : concept and modern

problems]. *Russian chemical.* Moscow, 2002. No. 5. Pp. 50–56. (in Russian).

10. Бычков Т. П. Современные проблемы и достижения в области технологии XXI века: тезисы доклада / Т. П. Бычков // Международная конференция. – Санкт- Петербург. – 2001. – С. 7–12.

T. Bychkov. *Sovremennie problemi i dostizheniya v oblasti tehnologii XXI veka* [Current problems and achievements in the field of XXI century technology : Theses of reports]. International conference. Saint-Petersburg. 2001. Pp. 7–12. (in Russian).

11. Нарита К. Кристаллическая структура неметаллических включений в стали / К. Нарита; под ред. П. П. Арсентьева. – Москва : Металлургия, 1969. – 190 с.

Narita R. *Kristallicheskaya struktura nemetallicheskih vklucheniij v stali* [Crystal structure of nonmetallic inclusions in steel]. Edited by P. P. Arsent'eva. Moscow : Metallurgiya Publ., 1969, 190 p. (in Russian).

12. M. Nastasi, W. Moller, W. Ensinger. Ion implantation and thin-film deposition. Handbook of plasma immersion, ion implantation and deposition. Edited by A. Anders. N. Y., USA, 2000. 736 p. . (in English).

13. Shiyan A. V. Determining the brittle strength and mechanical stability of structural steels. *Steel Transl.* 2013. Vol. 43, no. 11. Pp. 762–772. . (in English).

<http://link.springer.com/article/10.3103%2FS0967091213110193>

14. [http://www.kamet.com.ua/attachments/article/74/ky1\\_2\\_1.pdf](http://www.kamet.com.ua/attachments/article/74/ky1_2_1.pdf)

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. И. Г. Кириченко (Украина); д-ром техн. наук, проф. П. И. Стоевым (Украина)*

Поступила в редколлегию 12.12.2015

Принята к печати 14.12.2015