



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.793

**А.А. КУРИЛЕНОК**

младший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин<sup>1</sup>  
E-mail: AKTO13@mail.ru

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, доц.

заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин<sup>1</sup>  
E-mail: mbelotser@gmail.com

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.04.2017.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

*Разработана математическая модель выбора технологических режимов индукционной центробежной наплавки, обеспечивающих минимальную величину интенсивности изнашивания рабочих поверхностей наплавленного покрытия. Описаны результаты расчетно-экспериментального моделирования, из которых можно заключить, что для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия  $I_q = 6,37 \div 7,04 \cdot 10^{-5}$  мг/м параметры процесса индукционной центробежной наплавки должны быть следующие: температура изотермической выдержки  $T = 1100 \div 1150$  °С, время изотермической выдержки  $t = 180 \div 240$  с, частота вращения детали  $v = 2000 \div 2250$  об/мин.*

**Ключевые слова:** математическая модель, порошковая шихта, антифрикционные покрытия, центробежная индукционная наплавка, наноразмерные компоненты

**Введение.** Надежность работы оборудования современного машиностроительного производства зависит от срока службы наиболее нагруженных узлов, к которым относятся такие подвижные сопряжения, как подшипники скольжения.

Данные выпуска автотракторной техники, комбайнов, станочных систем, различного технологического оборудования на предприятиях Республики Беларусь в 2016 году свидетельствуют о том, что затраты на приобретение цветных металлов и сплавов, используемых для подшипников скольжения, втулок поворотных устройств, вкладышей различных типов, а также непосредственные затраты на их производство составляют около 300 тыс. долл. США. В этой связи разработка эффективных технологий изготовления биметаллических подшипников скольжения путем формирования антифрикционных

покрытий на внутренних поверхностях втулок является одной из важнейших задач, входящих в общую проблему ресурсосбережения в машиностроительном комплексе.

К настоящему времени накоплен значительный опыт успешного применения различных методов изготовления и восстановления [1, 2] деталей узлов трения скольжения с антифрикционными покрытиями, среди которых относительной простотой реализации, экономичностью, высокой прочностью сцепления с основой отличается центробежная индукционная наплавка [3–6]. Известно [7–9], что триботехнические свойства (износостойкость, прирабатываемость и коэффициент трения) определяют эффективность применения материалов в узлах трения, тогда для обоснованного выбора технологических режимов индукционной центробежной наплавки, обеспечивающих

минимальную величину интенсивности изнашивания рабочих поверхностей наплавленного покрытия, а также сокращения продолжительности и объема испытаний были использованы методы математического планирования эксперимента [10]. Это позволит обеспечить заданные характеристики и качества деталей наиболее производительным путем при минимальных затратах.

В связи с этим цель работы заключается в установлении зависимости минимальной интенсивности изнашивания материала покрытия  $I_q$  от параметров центробежной индукционной наплавки. В качестве основных факторов, влияющих на величину интенсивности изнашивания покрытия, рассматривались температура изотермической выдержки  $T$  (°C), время изотермической выдержки  $t$  (с), частота вращения детали  $\nu$  (об/мин).

**Методика и объект исследования.** В качестве антифрикционных материалов наиболее широкое распространение получили медные сплавы в виде латуни и бронзы. В качестве основного компонента шихты использовался порошок бронзы Бр.ОФ10-1 состава: Cu — 86,9÷90,6 %; Sn — 9÷11 %; P — 0,4÷1,1 %; примеси — 1 %, ГОСТ 613 с размером сферических частиц в диапазоне 63–125 мкм.

Для модифицирования бронзового порошка использовали карбидо-корундовый нанонаполнитель, включающий наноразмерные TiC и оксид алюминия  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (корунд), синтезированные методом газофазного осаждения в восстановительной атмосфере аммиака и водорода.

Центробежная индукционная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен»), оптический пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 об/мин. Температура нагрева контролировалась пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВПР-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. При наплавке шихта размещалась в полости стальной втулки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-88). После наплавки втулки с покрытиями подверглись механической обработке.

Триботехнические испытания выполнялись на машине трения возвратно-поступательного движения МТВП-2, предназначенной для лабораторной оценки антифрикционных и противозносных свойств смазочных и конструкционных материалов и покрытий на призматических образцах размером 10×6×6 мм в условиях граничного трения в среде синтетического масла 10W-40 по схеме возвратно-поступательного скольжения

контртела (материал Сталь 65Г) относительно неподвижного образца. Скорость скольжения составляла 0,1 м/с, номинальное давление  $p$  в процессе испытаний пошагово возрастало в диапазоне 30→50→70 МПа. Продолжительность испытаний на каждой из ступеней составляла  $L = 930$ – $1380$  м. В процессе фрикционных испытаний регистрировались коэффициент трения  $f$ , массовый износ  $\Delta m$ , определяемый по потере массы образцом путем его взвешивания на аналитических весах ВЛР-200, и интенсивность изнашивания  $I_q = \Delta m / L$ .

**Полученные результаты и их обсуждение.** Математическая модель уравнения отклика от независимых переменных с учетом эффектов их взаимодействий и ошибки эксперимента была представлена в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где  $y$  — параметр оптимизации;  $k$  — число факторов;  $i, l$  — номера факторов,  $i \neq l$ ;  $x_i, x_l$  — варьируемые факторы;  $b_0, b_i, b_{il}, b_{ii}$  — коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

Для получения модели процесса в виде полинома второй степени реализован некомпозиционный план второго порядка. Использование некомпозиционных планов, предусматривающих всего три уровня варьирования факторов (+1, 0, -1), упрощает и удешевляет проведение эксперимента. Некомпозиционные планы характеризуются наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей, в результате чего существенно упрощается вычисление коэффициентов модели.

Основное влияние на интенсивность изнашивания наплавленного покрытия оказывают температура при изотермической выдержке, время изотермической выдержки и частота вращения детали. Поэтому для исследования в качестве варьируемых факторов были взяты:  $T$  — температура при изотермической выдержке, °C;  $t$  — время изотермической выдержки, с;  $\nu$  — частота вращения детали, об/мин. В качестве параметра оптимизации приняли величину интенсивности изнашивания детали  $I_q$ , мг/м. На основе априорной информации были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов (таблица 1).

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице 2.

В соответствии с условиями опытов (см. таблицу 2) наплавливали покрытие и измеряли величину интенсивности изнашивания. Значения  $I_q$ , указанные в таблице 2, получены как средние из трех измерений.

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования, получена модель, характеризующая зависимость  $I_q$  от исследуемых факторов процесса и представляющая собой полином второй степени:

Таблица 1 — Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основной 0	верхний +1	нижний -1
Температура при изотермической выдержки $T$ , °C	$x_1$	100	1100	1200	1000
Время изотермической выдержки $t$ , с	$x_2$	60	180	240	120
Частота вращения детали $v$ , об/мин	$x_3$	500	2000	2500	1500

Таблица 2 — Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_{12}$	$x_{22}$	$x_{32}$	$I_q$ , мг/м
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,0000943
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,0001470
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,0001389
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,0001676
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000677
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,0001255
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,0001322
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,0001464
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,0001508
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000843
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,0000879
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,0001323
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,0001091
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,0001450
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000906

$$I_q = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (1)$$

Коэффициенты модели вычисляли по приведенным в [10] формулам:

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}y_j; \quad b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}x_{ij}y_j;$$

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u}.$$

Таблица 3 — Расчет дисперсии  $s^2\{I_q\}$

Номер опыта в центре плана	$I_q$	$\bar{I}_q$	$I_q - \bar{I}_q$	$(I_q - \bar{I}_q)^2$
5	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$8,09 \cdot 10^{-5}$	$-1,317 \cdot 10^{-5}$	$1,734 \cdot 10^{-10}$
10	$8,43 \cdot 10^{-5}$		$0,343 \cdot 10^{-5}$	$0,118 \cdot 10^{-10}$
15	$9,06 \cdot 10^{-5}$		$0,973 \cdot 10^{-5}$	$0,947 \cdot 10^{-10}$
$s^2\{I_q\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{2,799 \cdot 10^{-10}}{3 - 1} = 1,399 \cdot 10^{-10}$				$s_E = \sum (I_q - \bar{I}_q)^2 = 2,799 \cdot 10^{-10}$

После вычислений получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (с округлением до трех знаков после запятой):

$$b_0 = 8,087 \cdot 10^{-5}; \quad b_1 = -1,309 \cdot 10^{-5}; \quad b_2 = -1,441 \cdot 10^{-5};$$

$$b_3 = -1,143 \cdot 10^{-5}; \quad b_{12} = -0,6 \cdot 10^{-5}; \quad b_{13} = -0,058 \cdot 10^{-5};$$

$$b_{23} = -0,213 \cdot 10^{-5}; \quad b_{11} = 3,812 \cdot 10^{-5}; \quad b_{22} = 1,797 \cdot 10^{-5};$$

$$b_{33} = 1,974 \cdot 10^{-5}.$$

Дисперсию  $s^2\{I_q\}$  параметра оптимизации определяли по результатам опытов в центре плана (см. таблицу 2, опыты 5; 10; 15). Для вычисления дисперсии  $s^2\{I_q\}$  составлена таблица 3.

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, вычисляли по приведенным в [10] формулам при числе факторов  $k = 3$ . Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s^2\{I_q\} = 0,467 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s^2\{I_q\} = 0,175 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4} s^2\{I_q\} = 0,349 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{48} s^2\{I_q\} = 0,379 \cdot 10^{-10}.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели находим их доверительные интервалы. Доверительный интервал  $\Delta b_0$  коэффициента  $b_0$  находим по выражению:

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\} = \pm 2,04 \cdot 0,683 \cdot 10^{-5} = \pm 1,39 \cdot 10^{-5}, \quad (2)$$

где  $t_T$  — табличное значение критерия Стьюдента; при числе степеней свободы  $f$ , равном 30, и 5 %-м уровне значимости  $t_T = 2,04$ .

$$f = (n-1) \cdot N = (3-1) \cdot 15 = 30,$$

где  $N$  — число опытов в матрице планирования;  $n$  — число параллельных опытов.

Определяем доверительные интервалы коэффициентов  $b_p, b_{ii}, b_{ij}$  аналогично (2):

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\} = \pm 0,853 \cdot 10^{-5};$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 1,21 \cdot 10^{-5};$$

$$\Delta b_{ij} = \pm t_T s\{b_{ij}\} = \pm 1,26 \cdot 10^{-5}.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Коэффициенты  $b_{12}, b_{13}$  и  $b_{23}$  меньше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. Тогда уравнение регрессии (1) получает вид:

$$I_q = 8,087 \cdot 10^{-5} - 1,309 \cdot 10^{-5} x_1 - 1,441 \cdot 10^{-5} x_2 - 1,143 \cdot 10^{-5} x_3 + 3,812 \cdot 10^{-5} x_1^2 + 1,797 \cdot 10^{-5} x_2^2 + 1,974 \cdot 10^{-5} x_3^2. \quad (3)$$

Адекватность полученной модели проверяем по  $F$ -критерию Фишера. Для вычисления дисперсии  $s_{ад}^2$  адекватности находим сумму  $s_R$  квадратов отклонений расчетных значений  $\hat{I}_q$  от экспериментальных  $I_q$  во всех точках плана (таблица 4). Расчетные значения  $\hat{I}_q$  определяем по выражению (3),  $s_E = 2,799 \cdot 10^{-10}$  (см. таблицу 3).

Находим дисперсию:

$$s_{ад}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{14,064 \cdot 10^{-10} - 2,799 \cdot 10^{-10}}{15 - 7 - (3 - 1)} = 1,878 \cdot 10^{-10},$$

Таблица 4 — Вычисление суммы квадратов отклонений  $s_R$

Номер опыта	$I_q$	$\hat{I}_q$	$I_q - \hat{I}_q$	$(I_q - \hat{I}_q)^2$
1	$9,43 \cdot 10^{-5}$	$10,95 \cdot 10^{-5}$	$-1,52 \cdot 10^{-5}$	$2,295 \cdot 10^{-10}$
2	$14,7 \cdot 10^{-5}$	$13,83 \cdot 10^{-5}$	$0,87 \cdot 10^{-5}$	$0,761 \cdot 10^{-10}$
3	$13,89 \cdot 10^{-5}$	$13,56 \cdot 10^{-5}$	$0,33 \cdot 10^{-5}$	$0,107 \cdot 10^{-10}$
4	$16,76 \cdot 10^{-5}$	$16,45 \cdot 10^{-5}$	$0,32 \cdot 10^{-5}$	$0,099 \cdot 10^{-10}$
5	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$8,09 \cdot 10^{-5}$	$-1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,734 \cdot 10^{-10}$
6	$12,55 \cdot 10^{-5}$	$11,42 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$1,274 \cdot 10^{-10}$
7	$13,22 \cdot 10^{-5}$	$13,71 \cdot 10^{-5}$	$-0,49 \cdot 10^{-5}$	$0,236 \cdot 10^{-10}$
8	$14,64 \cdot 10^{-5}$	$14,04 \cdot 10^{-5}$	$0,60 \cdot 10^{-5}$	$0,362 \cdot 10^{-10}$
9	$15,08 \cdot 10^{-5}$	$16,32 \cdot 10^{-5}$	$-1,24 \cdot 10^{-5}$	$1,547 \cdot 10^{-10}$
10	$8,43 \cdot 10^{-5}$	$8,09 \cdot 10^{-5}$	$0,34 \cdot 10^{-5}$	$0,118 \cdot 10^{-10}$
11	$8,79 \cdot 10^{-5}$	$9,27 \cdot 10^{-5}$	$-0,48 \cdot 10^{-5}$	$0,234 \cdot 10^{-10}$
12	$13,23 \cdot 10^{-5}$	$11,56 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$2,793 \cdot 10^{-10}$
13	$10,91 \cdot 10^{-5}$	$12,16 \cdot 10^{-5}$	$-1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,553 \cdot 10^{-10}$
14	$14,50 \cdot 10^{-5}$	$14,44 \cdot 10^{-5}$	$0,06 \cdot 10^{-5}$	$0,003 \cdot 10^{-10}$
15	$9,06 \cdot 10^{-5}$	$8,09 \cdot 10^{-5}$	$0,97 \cdot 10^{-5}$	$0,947 \cdot 10^{-10}$
$s_R = \sum (I_q - \hat{I}_q)^2 = 14,064 \cdot 10^{-10}$				

где  $N$  — общее количество опытов;  $k'$  — количество коэффициентов аппроксимирующего полинома (количество значимых факторов);  $n_0$  — количество опытов в центре плана.

Дисперсия  $s^2\{I_q\} = 1,399 \cdot 10^{-10}$  (см. таблицу 3), поэтому расчетное значение  $F$ -критерия:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{I_q\}} = 1,342.$$

Табличное значение  $F$ -критерия при 5 %-м уровне значимости и числа степеней свободы для большей дисперсии  $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 6$ , меньшей дисперсии  $m_2 = n_0 - 1 = 2$ ,  $F_T = 19,3$ . Так как  $F_p < F_T$ , полученная модель (3) адекватна при 5 %-м уровне значимости.

Анализ уравнения (3) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение фактора  $x_1$  в большей степени влияет на уменьшение показателя интенсивности изнашивания, чем у факторов  $x_2$  и  $x_3$ , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (3) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор  $x_1$ .

Для удобства интерпретации полученных результатов и использования уравнения (3) для практических расчетов необходимо перейти от кодированных значений ( $x_1, x_2, x_3$ ) факторов к натуральным значениям ( $T, t, v$ ). Для этого использовали следующие формулы:

$$x_1 = \frac{T - T_0}{\Delta T}; \quad x_2 = \frac{t - t_0}{\Delta t}; \quad x_3 = \frac{v - v_0}{\Delta v},$$

где  $T_0, t_0, v_0$  — натуральные значения факторов на основных уровнях;  $\Delta T, \Delta t, \Delta v$  — значения интервалов варьирования.

Таким образом, в соответствии с таблицей 2 получаем уравнения:

$$x_1 = \frac{T - 1100}{100}; \quad x_2 = \frac{t - 180}{60}; \quad x_3 = \frac{v - 1500}{500}.$$

С учетом перехода к натуральным значениям факторов уравнение регрессии (3) примет вид:

$$I_q \cdot 10^{-5} = 540,39 - 0,85173 \cdot T - 0,20372 \cdot t - 0,003387 \cdot v + 0,00038 \cdot T^2 + 0,00049 \cdot t^2 + 0,000008 \cdot v^2. \quad (4)$$

Уравнение регрессии (4) можно использовать для выбора технологических режимов индукционной центробежной наплавки, обеспечивающих минимальную величину интенсивности изнашивания рабочих поверхностей наплавленного покрытия. На рисунках 1–3 представлены полученные с помощью уравнения (4) графические зависимости интенсивности изнашивания от исследуемых факторов. При построении поверхности откликов (программа SigmaPlot 11) варьировались только два фактора.

Как видно из рисунков 1–3, с увеличением температуры изотермической выдержки  $T$  умень-

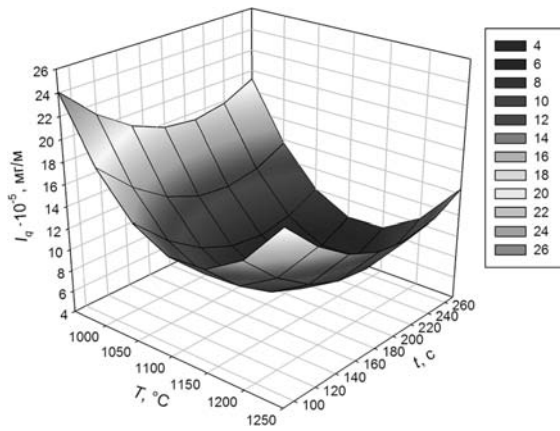


Рисунок 1 — Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от температуры изотермической выдержки  $T$  и времени выдержки  $t$  ( $\nu = 2000$  об/мин)

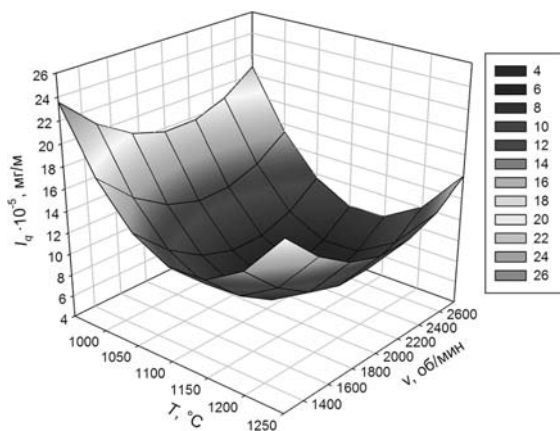


Рисунок 2 — Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от температуры изотермической выдержки  $T$  и частоты вращения детали  $\nu$  ( $t = 180$  с)

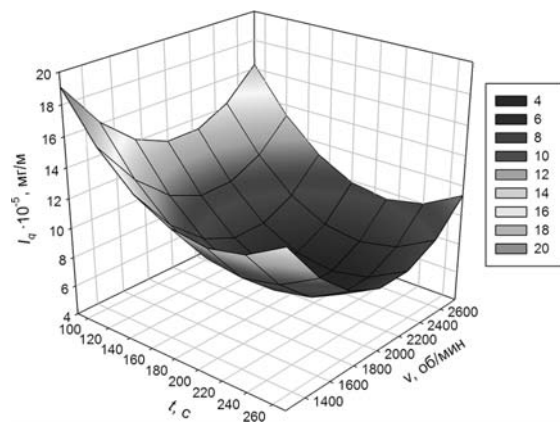


Рисунок 3 — Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от времени изотермической выдержки  $t$  и частоты вращения детали  $\nu$  ( $T = 1100$  °C)

шается интенсивность изнашивания, однако до определенного предела, после которого увеличение  $T$  приводит к увеличению интенсивности изнашивания. Аналогично изменение времени изотермической выдержки  $t$  и частоты вращения детали  $\nu$  влечет за собой такие же изменения интенсивности изнашивания, но в меньшей степени. Из рисунка 1 видно, что при частоте вращения де-

тали  $\nu = 2000$  об/мин минимальная интенсивность изнашивания  $I_q = 6,37 \div 7,04 \cdot 10^{-5}$  мг/м обеспечивается при температуре изотермической выдержки  $T = 1100 \div 1150$  °C и времени изотермической выдержки  $t = 180 \div 240$  с, дальнейшее увеличение этих параметров технически и экономически не рационально.

Таким образом, на основании результатов расчетно-экспериментального моделирования можно заключить, что для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия  $I_q = 6,37 \div 7,04 \cdot 10^{-5}$  мг/м параметры процесса индукционной центробежной наплавки должны быть следующие: температура изотермической выдержки  $T = 1100 \div 1150$  °C, время изотермической выдержки  $t = 180 \div 240$  с, частота вращения детали  $\nu = 2000 \div 2250$  об/мин.

**Выводы.** В результате проведенных исследований выполнена оптимизация процесса центробежной индукционной наплавки антифрикционных износостойких покрытий, проведенная с использованием методов математического планирования эксперимента, что позволило разработать математическую модель и определить область значений технологических режимов (температура изотермической выдержки  $T = 1100 \div 1150$  °C, время изотермической выдержки  $t = 180 \div 240$  с, частота вращения детали  $\nu = 2000 \div 2250$  об/мин), для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия  $I_q$ . Проведенная практическая проверка полученной модели показала ее адекватность в пределах выбранных интервалов варьирования технологических параметров.

## Список литературы

1. Дорожкин, Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н.Н. Дорожкин. — Минск: Наука и техника, 1975. — 152 с.
2. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов. — Минск: Технопринт, 2000. — 268 с.
3. Рябцев, И.А. Индукционная наплавка / И.А. Рябцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2005. — № 11. — С. 37–40.
4. Gafo, Yu.N. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings / Yu.N. Gafo, I.A. Sosnovskij // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2009. — Vol. 48, No. 1–2. — Pp. 105–111.
5. Дорожкин, Н.Н. Теоретические основы получения деталей с припеченным слоем / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, Л.П. Кашицин // Докл. Академии наук БССР. — 1974. — Т. 18, № 5. — С. 428–431.
6. Данильченко, Б.В. Наплавка / Б.В. Данильченко. — Киев: Наук. думка, 1983. — 75 с.
7. Пенкин, Н.С. Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин. — М.: Машиностроение, 2008. — 206 с.
8. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 386 с.
9. Гриб, В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В.В. Гриб, Г.Е. Лазарев. — М.: Наука, 1968. — 141 с.
10. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

KURILYONOK Artem A.

Junior Researcher<sup>1</sup>

E-mail: AKTO13@mail.ru

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening<sup>1</sup>

E-mail: mbelotser@gmail.com

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 26 April 2017.

## OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF INDUCTION CENTRIFUGAL WELD OF ANTIFRICTION COATINGS BY THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT

*The mathematical model has been developed that can be used to select the technological modes of induction centrifugal surfacing, which provide the minimum value of the wear rate of the working surfaces of the deposited coating. The results of computational and experimental modeling are described, from which it can be concluded that in order to obtain the optimum wear rate of the coating material  $I_q = 6,37 \div 7,04 \cdot 10^{-5} \text{ mg/m}$ , the parameters of the induction centrifugal surfacing process should be as follows: temperature isothermal holding  $T = 1100 \div 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ , isothermal holding time  $t = 180 \div 240 \text{ sec}$ , rotation speed  $v = 2000 \div 2250 \text{ rpm}$ .*

**Keywords:** mathematical model, powder batch, antifriction coatings, centrifugal induction weld deposition, nanosized components

### References

1. Dorozhkin N.N. *Uprochnenie i vosstanovlenie detalei mashin metallicheskim poroshkami* [Hardening and restoration of machine parts with metal powders]. Minsk, Nauka i tehnika, 1975. 152 p.
2. Mrochek Zh.A., Kozhuro L.M., Filonov I.P. *Progressivnye tehnologii vosstanovlenija i uprochneniya detalej mashin: ucheb. posobie* [Progressive technologies of restoration and hardening of machine parts: a manual]. Minsk, Tehnoprnt, 2000. 268 p.
3. Rjabcev I.A. *Indukcionnaja naplavka* [Induction weld]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija* [Repairs. Recovery. Modernization], 2005, no. 11, pp. 37–40.
4. Gafo Yu.N., Sosnovskij I.A. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2009, vol. 48, no. 1–2, pp. 105–111.
5. Dorozhkin N.N., Abramovich T.M., Kashicin L.P. *Teoreticheskie osnovy poluchenija detalej s pripechenym sloem* [Theoretical basis for obtaining parts with a baked layer]. *Doklady Akademii nauk BSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR], 1974, vol. 18, no. 5, pp. 428–431.
6. Danilchenko B.V. *Naplavka* [Surfacing]. Kiev, Naukova Dumka, 1983, 75 p.
7. Penkin N.S., Penkin A.N., Serbin V.M. *Osnovy tribologii i tribotehniki* [Basics of tribology and tribotechnics]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 206 p.
8. Myshkin N.K., Petrokovec M.I. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehniczeskie prilozhenija tribologii* [Friction, lubrication, wear. Physical bases and technical applications of tribology]. Moscow, Fizmatlit, 2007. 386 p.
9. Grib V.V., Lazarev G.E. *Laboratornye ispytaniya materialov na trenie i iznos* [Laboratory testing of materials for friction and wear]. Moscow, Nauka, 1968. 141 p.
10. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 184 p.