



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.
заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

А.А. КУРИЛЁНОК, канд. техн. наук
старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин¹
E-mail: AKTO13@mail.ru

К.Е. БЕЛЯВИН, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» им. С.И. Губкина²
E-mail: dz-m@tut.by

И.А. СОСНОВСКИЙ
старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин¹
E-mail: sos3@tut.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22.03.2021.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МНОГОСЛОЙНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В результате проведенных исследований и с использованием методов математического планирования эксперимента была выполнена оптимизация процесса многослойной центробежной индукционной наплавки антифрикционных покрытий на основе алюминиевых сплавов, что позволило разработать математическую модель и определить оптимальную область значений технологических режимов. Установлены зависимости минимальной интенсивности изнашивания материала покрытия I_q (мг/м) от параметров многослойной индукционной центробежной наплавки покрытий из алюминиевых сплавов. В качестве основных факторов, влияющих на величину интенсивности изнашивания покрытия, рассматривались температура нагрева детали T (°C), время изотермической выдержки t (мин), частота вращения детали n (об/мин). На основании результатов расчетно-экспериментального моделирования показано, что для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия на основе алюминиевого сплава параметры процесса многослойной центробежной индукционной наплавки должны быть следующие: частота вращения детали $n = 1750-1875$ об/мин, температура нагрева детали $T = 775-800$ °C, время изотермической выдержки $t = 7-8$ мин.

Ключевые слова: оптимизация, методы математического планирования, математическая модель, антифрикционные покрытия, сплавы на основе алюминия, свинцовый порошковый подслой, многослойная центробежная индукционная наплавка

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-35-41>

Введение. Процессы нанесения покрытий с применением электрофизического нагрева широко используются в технике для восстановления, упрочнения и изготовления деталей различного

назначения [1–2]. Индукционный нагрев является одним из видов электротермического нагрева, который сочетает в себе такие достоинства, как бесконтактная передача энергии от индуктора к детали, высокий КПД использования электроэнергии, возможность поверхностного и локального нагрева [3–4].

Центробежный метод нанесения покрытий предусматривает обязательное вращение детали (стальной заготовки) для обеспечения формования наносимого материала. Покрытия могут быть образованы на внутренних, наружных, торцевых поверхностях цилиндрических и плоских деталей методами одиночной или групповой обработки. Технология позволяет наносить покрытия в режимах припекания и наплавки, сочетать одновременно процессы сварки и наплавки [5–7]. Кроме того, согласно [5, 8, 10, 11], использование данной технологии позволяет получать изделия с антифрикционными покрытиями типа стальная втулка с антифрикционными и износостойкими покрытиями на основе никелевых, железных и медных сплавов.

В качестве альтернативы технологиям нанесения покрытий из сплавов на медной основе в узлах триботехнического назначения, работающих при давлениях до 30 МПа, в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разрабатывается технология нанесения композиций на основе алюминиевых сплавов на стальные изделия методом многослойной индукционной наплавки в поле центробежных сил [12–13], которая должна обеспечивать повышение структурных и физико-механических свойств наносимых покрытий из алюминиевых сплавов на рабочие поверхности деталей узлов трения различных машин и механизмов, а также повышение конструкционной прочности, надежности, долговечности и ресурса работы биметаллических деталей.

Для обоснованного выбора технологических режимов многослойной центробежной индукционной наплавки на основе алюминиевых сплавов, обеспечивающих минимальную величину интенсивности изнашивания рабочих поверхностей наплавленного покрытия, а также сокращения продолжительности и объема испытаний были использованы методы математического планирования эксперимента [14]. Это позволит обеспечить заданные характеристики и качества деталей наиболее производительным путем при минимальных затратах.

Целью настоящей работы является установление зависимости минимальной интенсивности изнашивания материала покрытия I_q (мг/м) от параметров многослойной индукционной центробежной наплавки покрытий из алюминиевых сплавов. В качестве основных факторов, влияющих на величину интенсивности изнашивания покрытия, рассматривались температура нагрева

детали T (°C), время изотермической выдержки t (мин), частота вращения детали n (об/мин).

Материалы, оборудование, методика и объект исследования. В качестве материала для нанесения покрытия использовали алюминий-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93). Этот сплав имеет повышенный уровень литейных и механических свойств, а также обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью при температурах до 200 °C. Данный сплав был представлен кусками проволоки диаметром 1,75–2,0 мм и длиной 10–15 мм, масса которых обеспечивала получение покрытия толщиной 4–5 мм на сторону. Состав сплава АК12 приведен в таблице 1.

Высокий процент кремния (10–13 масс.%) в сплаве обеспечивает хорошую жидкотекучесть и литейные свойства (дает малую усадку и практически не образует трещин), позволяя понижать температуру литья, а также делает сплав АК12 более теплоустойчивым и износостойким, по сравнению с бронзой. В качестве материала подслоя использовали порошок свинца марки ПС-1. При этом размер порошковых частиц свинца составлял 0,5–0,63 мм, а толщина подслоя — 1,0–1,5 мм на сторону. Для раскисления загружаемой во внутреннюю полость наносимой шихты использовали покровно-модифицирующий флюс в количестве 5 % от массы металлической составляющей шихты.

Многослойная индукционная центробежная 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»), инфракрасный пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 об/мин⁻¹. 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). Для последующих исследований полученные образцы подвергались токарной и дробеструйной обработке.

Триботехнические испытания образцов проводились на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца относительно неподвижного стального контртела, в качестве которого использовался торец стального ролика из сплава ШХ15 (твердость 60–62 HRC)

Таблица 1 — Состав сплава АК12 (в масс.%)
Table 1 — Composition of the AK12 alloy (in wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Zn	Al
10–13	до 1,5	до 0,6	до 0,5	до 0,01	до 0,1	до 0,3	ост.

диаметром 3 мм. Испытание проводилось при давлениях p , равных 10, 20 и 30 МПа. Амплитуда перемещения составляла 5 мм с частотой 10 Гц. Длительность испытания в нагруженном состоянии составляла 2 ч. По результатам испытаний определялся коэффициент трения f , массовый износ Δm , интенсивность изнашивания I_q ($I_q = \Delta m/L$, где L — суммарный путь трения), а также суммарный линейный износ пары трения. Потеря массы Δm образцов определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200.

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: n — частота вращения детали, об/мин⁻¹; T — температура нагрева детали, °С; t — время изотермической выдержки, 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 2).

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице 3.

В соответствии с условиями опытов наплавили покрытие и замеряли величину интенсивности изнашивания. Значения I_q , указанные в таблице 3, получены как средние из трех измерений.

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования, получена модель, характеризующая зависимость I_q от исследуемых факторов

Таблица 2 — Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 2 — Levels and intervals of factors variation

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основной 0	верхний +1	нижний -1
Частота вращения детали n , об/мин ⁻¹	x_1	250	1750	2000	1500
Температура нагрева детали T , °С	x_2	50	800	850	750
Время изотермической выдержки t , с	x_3	2	8	10	6

Таблица 3 — Матрица планирования и результаты опытов
Table 3 — Planning matrix and experiment results

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_{12}	x_{22}	x_{32}	I_q , мг/м
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,0003140
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,0002040
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,0005800
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,0006350
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000090
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,0003100
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,0001920
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,0006200
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,0005930
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000190
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,0002100
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,0000890
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,0000690
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,0000800
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000170

процесса и представляет собой полином второй степени:

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

Коэффициенты модели вычисляли по приведенным формулам:

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

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

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

$$b_0 = 0,15 \cdot 10^{-4}; \quad b_1 = -1,76 \cdot 10^{-4}; \quad b_2 = 0,256 \cdot 10^{-4};$$

$$b_3 = 0,319 \cdot 10^{-4}; \quad b_{12} = 0,413 \cdot 10^{-4}; \quad b_{13} = 0,228 \cdot 10^{-4};$$

$$b_{23} = 0,33 \cdot 10^{-4}; \quad b_{11} = 3,675 \cdot 10^{-4};$$

$$b_{22} = 0,5075 \cdot 10^{-4}; \quad b_{33} = 0,4625 \cdot 10^{-4}.$$

Дисперсию $s^2\{I_q\}$ параметра оптимизации определяли по результатам опытов в центре плана (см. таблицу 3, опыты 5, 10, 15). Для вычисления дисперсии $s^2\{I_q\}$ составлена вспомогательная таблица 4.

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

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s^2\{I_q\} = 0,093 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s^2\{I_q\} = 0,035 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4} s^2\{I_q\} = 0,07 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{48} s^2\{I_q\} = 0,076 \cdot 10^{-10}.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели находим их доверительные интервалы. Доверительный интервал Δb_0 коэффициента b_0 находим по выражению:

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\} = \pm 2,04 \cdot 0,031 \cdot 10^{-4} = \pm 0,062 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

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

Таблица 4 — Вспомогательная таблица для расчета $s^2\{I_q\}$
Table 4 — Auxiliary table for calculating $s^2\{I_q\}$

Номер опыта в центре плана	I_q	\bar{I}_q	$I_q - \bar{I}_q$	$(I_q - \bar{I}_q)^2$
5	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$-0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,36 \cdot 10^{-10}$
10	$0,19 \cdot 10^{-4}$		$0,04 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-10}$
15	$0,17 \cdot 10^{-4}$		$0,02 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot 10^{-10}$
$s^2\{I_q\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{0,56 \cdot 10^{-10}}{3 - 1} = 0,28 \cdot 10^{-10}$				$s_E = \sum (I_q - \bar{I}_q)^2 = 0,56 \cdot 10^{-10}$

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

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

Аналогично определяем доверительные интервалы коэффициентов b_i, b_{ii}, b_{ii} :

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\} = \pm 0,038 \cdot 10^{-4};$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 0,054 \cdot 10^{-4};$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 0,056 \cdot 10^{-4}.$$

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:

$$I_q = 0,15 \cdot 10^{-4} - 1,76 \cdot 10^{-4} x_1 + 0,256 \cdot 10^{-4} x_2 + 0,319 \cdot 10^{-4} x_3 + 0,413 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 + 0,228 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 + 0,33 \cdot 10^{-4} x_2 x_3 + 3,675 \cdot 10^{-4} x_{12} + 0,508 \cdot 10^{-4} x_{22} + 0,463 \cdot 10^{-4} x_{32}. \quad (3)$$

Адекватность полученной модели проверяем по F -критерию Фишера. Для вычисления дисперсии $s_{ал}^2$ адекватности находим сумму s_R квадратов отклонений расчетных значений \hat{I}_q от экспериментальных I_q во всех точках плана (таблица 5). Расчетные значения \hat{I}_q определяем по выражению (3), $s_E = 0,56 \cdot 10^{-10}$ (см. таблицу 4).

Находим дисперсию:

$$s_{ал}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{13,62 \cdot 10^{-10} - 0,56 \cdot 10^{-10}}{15 - 10 - (3 - 1)} = 4,35 \cdot 10^{-10},$$

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

Дисперсия $s^2\{I_q\} = 0,28 \cdot 10^{-10}$ (см. таблицу 4), поэтому расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{s_{ал}^2}{s^2\{I_q\}} = \frac{4,35 \cdot 10^{-10}}{0,28 \cdot 10^{-10}} = 15,54.$$

Табличное значение F -критерия при 5-процентном уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 3$,

Таблица 5 — Вспомогательная таблица для вычисления s_R
 Table 5 — Auxiliary table for calculating s_R

Номер опыта	I_q	\hat{I}_q	$I_q - \hat{I}_q$	$(I_q - \hat{I}_q)^2$
1	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$-0,10 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$
2	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$
3	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$-0,14 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$
4	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$0,10 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$
5	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$-0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,36 \cdot 10^{-10}$
6	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$0,03 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-10}$
7	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$-0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-10}$
8	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,14 \cdot 10^{-4}$	$0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-10}$
9	$5,93 \cdot 10^{-4}$	$5,96 \cdot 10^{-4}$	$-0,03 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-10}$
10	$0,19 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-10}$
11	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,56 \cdot 10^{-10}$
12	$0,89 \cdot 10^{-4}$	$0,73 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
13	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$0,85 \cdot 10^{-4}$	$-0,16 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
14	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,88 \cdot 10^{-4}$	$-0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,56 \cdot 10^{-10}$
15	$0,17 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,02 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot 10^{-10}$
$s_R = \sum (I_q - \hat{I}_q)^2 = 13,62 \cdot 10^{-10}$				

меньшей дисперсии $m_2 = n_0 - 1 = 2$, $F_T = 19,2$. Так как $F_p < F_T$, полученная модель (3) адекватна при 5-процентном 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 (n, T, t). Для этого использовали следующие формулы:

$$x_1 = \frac{n - n_0}{\Delta n}; \quad x_2 = \frac{T - T_0}{\Delta T}; \quad x_3 = \frac{t - t_0}{\Delta t},$$

где n_0, T_0, t_0 — натуральные значения факторов на основных уровнях; $\Delta n, \Delta T, \Delta t$ — значения интервалов варьирования.

Таким образом, в соответствии с таблицей 2,

$$x_1 = \frac{n - 1750}{250}; \quad x_2 = \frac{T - 800}{50}; \quad x_3 = \frac{t - 8}{2}.$$

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

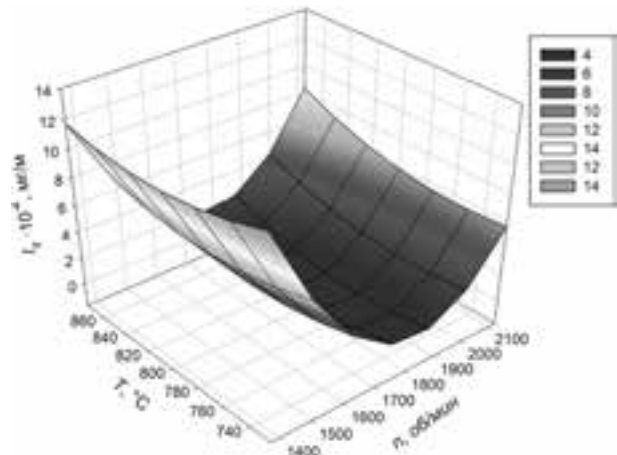


Рисунок 1 — Зависимость интенсивности изнашивания I_q от частоты вращения детали n и температуры нагрева детали T ($t = 8$ мин)

Figure 1 — Dependence of the wear rate I_q on the speed of rotation of the part n and the heating temperature of the part T ($t = 8$ min)

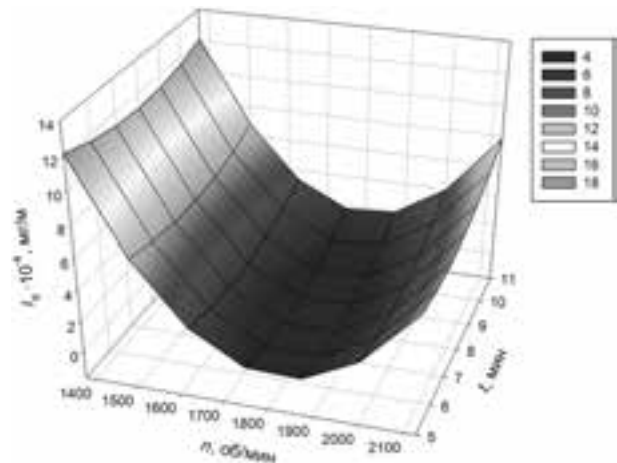


Рисунок 2 — Зависимость интенсивности изнашивания I_q от частоты вращения детали n и времени изотермической выдержки t ($T = 800$ °C)

Figure 2 — Dependence of the wear rate I_q on the speed of rotation of the part n and the isothermal exposure time t ($T = 800$ °C)

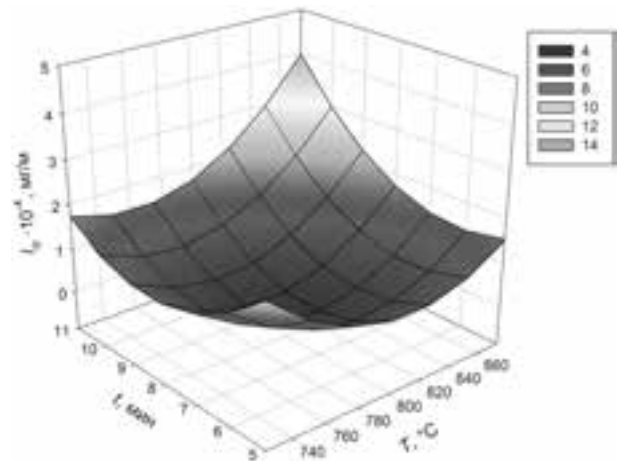


Рисунок 3 — Зависимость интенсивности изнашивания I_q от температуры нагрева детали T и времени изотермической выдержки t ($n = 1,750$ об/мин⁻¹)

Figure 3 — Dependence of the wear rate I_q on the heating temperature of the part T and the isothermal exposure time t ($n = 1,750$ rpm⁻¹)

$$I_q \cdot 10^{-4} = 398,39 - 0,243 \cdot n - 0,404 \cdot T - 5,13 \cdot t + 0,000033 \cdot n \cdot T + 0,00046 \cdot n \cdot t + 0,0033 \cdot T \cdot t + 0,000059 \cdot n^2 + 0,0002 \cdot T^2 + 0,116 \cdot t^2 \quad (4)$$

Уравнение регрессии (4) можно использовать для выбора технологических режимов центробежной индукционной 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 12) варьировались только два фактора.

Как видно из рисунков 1–3, изменение частоты вращения детали n влечет за собой изменения интенсивности изнашивания в большей степени, чем температура нагрева детали T или изотермическая выдержка t . Из рисунка 3 видно, что при частоте вращения детали $n = 1750 \text{ мин}^{-1}$, минимальная интенсивность изнашивания $I_q = 0,13\text{--}0,18 \cdot 10^{-4} \text{ мг/м}$ обеспечивается при температуре нагрева детали $T = 775\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ и времени изотермической выдержки $t = 7\text{--}8 \text{ мин}$ и дальнейшее увеличение этих параметров технически и экономически нецелесообразно.

Выводы. В результате проведенных исследований и с использованием методов математического планирования эксперимента была выполнена оптимизация процесса многослойной центробежной индукционной наплавки антифрикционных покрытий на основе алюминиевых сплавов, что позволило разработать математическую модель и определить оптимальную область значений технологических режимов наплавки. На основании результатов расчетно-экспериментального моделирования показано, что для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия на основе алюминиевого сплава параметры процесса центробежной индукционной наплавки должны быть следующие: частота вращения детали $n = 1750\text{--}1875 \text{ об/мин}$, температура нагрева детали $T = 775\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$, время изотермической выдержки $t = 7\text{--}8 \text{ мин}$.

Список литературы

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. думка, 1998. — 583 с.
2. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е. Белявин [и др.]. — Минск: Ремико, 1997. — 180 с.
3. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев [и др.]. — М.: Машиностроение, 1970. — 184 с.
4. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
5. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин [и др.]. — Минск: Наука и техника, 1993. — 159 с.
6. Белявин, К.Е. Инженерные методы расчета температурно-временных параметров в процессах центробежной индукционной наплавки покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т., под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. — Витебск: УО «ВГТУ», 2019. — Т. 2. — С. 5–18.
7. Сосновский, И.А. Термические параметры центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо // Инженерно-физический журнал. — 2011. — Т. 84, № 6. — С. 1135–1141.
8. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. ПГУ, Серия В. — 2016. — № 3. — С. 66–74.
9. Технологические процессы и оборудование для нанесения покрытий центробежным методом с использованием двухступенчатого индукционного нагрева / И.А. Сосновский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2012. — Вып. 1. — С. 401–405.
10. Gafo, Yu.N. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings / Yu.N. Gafo, I.A. Sosnovskii // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2009. — № 48(1). — Pp. 105–111. DOI: 10.1007/s11106-009-9087-x.
11. Induction centrifugal surfacing of the charge based on tin bronze powders with the addition of finely dispersed boehmite / I.A. Sosnovskiy [et al.] // Welding International. — 2016. — № 30(9). — Pp. 736–739. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1143590>.
12. Влияние олова в материале подслоя на структуру Al-Si сплава, наплавленного центробежно индукционным методом / А.И. Комаров [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 3(48). — С. 77–84.
13. Технологические особенности получения биметаллических втулок с антифрикционным покрытием из сплава АК12 / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 320–324.
14. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

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

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Hardening of Machine Parts¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

KURILYONOK Artem A., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Hardening of Machine Parts¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

BELYAVIN Klimentiy E., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department “Machines and Technology of Metal Forming” named after S.I. Gubkin²

E-mail: dz-m@tut.by

SOSNOVSKY Igor A.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Hardening of Machine Parts¹

E-mail: sos3@tut.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 22 March 2021.

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF MULTILAYER CENTRIFUGAL INDUCTION SURFACING OF COATINGS BASED ON ALUMINUM ALLOYS

As a result of the conducted research, using the methods of mathematical planning of the experiment, the optimization of the process of multilayer centrifugal induction surfacing of antifriction coatings based on aluminum alloys was performed, which made it possible to develop a mathematical model and determine the optimal range of values of technological modes. The dependences of the minimum wear rate of the coating material I_q (mg/m) on the parameters of multilayer induction centrifugal surfacing of aluminum alloy coatings are established. The main factors affecting the wear rate of the coating were the heating temperature of the part T (°C), the time of the isothermal exposure t (min) and the speed of rotation of the part n (rpm). Based on the results of computational and experimental modeling, it is shown that in order to obtain the optimal wear intensity of the aluminum alloy coating material, the parameters of the multilayer centrifugal induction surfacing process should be as follows: the rotation speed of the part $n = 1,750\text{--}1,875$ rpm, the heating temperature of the part $T = 775\text{--}800$ °C, the isothermal exposure time $t = 7\text{--}8$ min.

Keywords: optimization, mathematical planning methods, mathematical model, antifriction coatings, aluminum-based alloys, lead powder sublayer, multilayer centrifugal induction surfacing

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-35-41>

References

- Vityaz P.A., Ivashko A.S., Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I., Manelo E.D. *Teoriya i praktika naneseniya zashchitnykh pokrytiy* [Theory and practice of applying protective coatings]. Minsk, Belaruskaya dumka Publ., 1998. 583 p. (in Russ.).
- Belyavin K.E., Mazyuk V.V., Minko D.V., Sheleg V.K. *Teoriya i praktika elektroimpulsnogo spekaniya poristykh poroshkovykh materialov* [Theory and practice of electro-pulse sintering of porous powder materials]. Minsk, Remiko Publ., 1997. 180 p. (in Russ.).
- Tkachev V.N., Fishteyn B.M., Kazintsev N.V., Aldyrev D.A. *Induktsionnaya naplavka tverdykh splavov* [Induction surfacing of hard alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 184 p. (in Russ.).
- Slukhotskiy A.E., Ryskin S.E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 70 p. (in Russ.).
- Dorozhkin N.N., Kashitsin L.P., Abramovich T.M., Kirpichenko I.A. *Tsentrobeznoye pripekanie poroshkovykh pokrytiy pri peremennykh silovykh vozdeystviyakh* [Centrifugal sintering of powder coatings with varying force effects]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1993. 160 p. (in Russ.).
- Belyavin K.E., Sosnovskiy I.A., Kurilyonok A.A. *Inzhenernye metody rascheta temperaturno-vremennykh parametrov v protsessakh tsentrobeznoy induktsionnoy naplavki pokrytiy* [Engineering methods for calculating temperature and time parameters in the processes of centrifugal induction surfacing of coatings]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii. Tom 2*, 2019, ch. 1, pp. 5–18 (in Russ.).
- Sosnovskiy I.A., Gafo Yu.N. *Termicheskie parametry tsentrobeznoy induktsionnoy naneseniya poroshkovykh pokrytiy* [Thermal parameters of centrifugal induction powder coating]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 1135–1142 (in Russ.).
- Belotserkovskiy M.A., Sosnovskiy I.A., Kurilyonok A.A., Kuznechik O.O. *Modelirovaniye protsessov induktsionnoy naplavki poroshkovykh pokrytiy, sodержashchikh nanorazmernye modifikatory* [Modeling of the process of induction welding powder surfaces containing nanodimensional modifiers]. *Vestnik PGU, Seriya B*, 2016, no. 3, pp. 66–74 (in Russ.).
- Sosnovskiy I.A., Belotserkovskiy M.A., Gafo Yu.N., Kurilyonok A.A. *Tekhnologicheskie protsessy i oborudovaniye dlya naneseniya pokrytiy tsentrobeznoy metodom s ispolzovaniem dvukhstupenchatogo induktsionnogo nagreva* [Technological processes and equipment for coating application by centrifugal method using two-stage induction heating]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2012, iss. 1, pp. 401–405 (in Russ.).
- Gafo Yu.N., Sosnovskiy I.A. *Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder. Powder metallurgy and metal ceramics*, 2009, vol. 48, no. 1–2, pp. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-009-9087-x>.
- Sosnovskiy I.A., Kurilyonok A.A., Belotserkovskiy M.A., Kuznechik O.O., Grigorev E.G. *Induction centrifugal surfacing of the charge based on tin bronze powders with the addition of finely dispersed boehmite. Welding international*, 2016, vol. 30, no. 9, pp. 736–739. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1143590>.
- Komarov A.I., Sosnovskiy I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. *Vliyanie olova v materiale podsloya na strukturu Al-Si splava, naplavlyvaemogo tsentrobezno induktsionnym metodom* [Influence of tin in underlayer material on Al-Si alloy structure deposited using centrifugal induction method]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 3(48), pp. 77–84 (in Russ.).
- Belotserkovskiy M.A., Komarov A.I., Sosnovskiy I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. *Tekhnologicheskie osobennosti polucheniya bimetallicheskiy vtulok s antifriktsionnym pokrytiem iz splava AK12* [Technological features of obtaining bimetallic sleeves with antifriction coating from AlSi12 alloy]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 320–324 (in Russ.).
- Spiridonov A.A. *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russ.).