

УДК 669.018.95

В.И. ЖОРНИК, д-р техн. наук, доц.заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов¹

E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доц.заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

А.М. ПАРНИЦКИЙмладший научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов¹**А.П. ЯЛОВИК**генеральный директор²¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь²ОАО «Нефтезаводмонтаж», г. Новополоцк, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 16.07.2018.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПРИРАБОТОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ И РЕЖИМОВ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

С использованием метода расчетно-экспериментального моделирования разработана математическая модель процесса трибомеханического модифицирования газотермических стальных покрытий, позволяющая выбирать оптимальные режимы приработки в зависимости от заданных показателей поверхности трения после трибомеханической обработки. При этом в качестве параметров оптимизации выступают концентрация наноразмерной добавки в прирабочной композиции, давление в контакте и скорость скольжения, а критериями оптимизации являются коэффициент трения, твердость поверхности и путь трения при приработке. Показано, что, например, с целью трибомеханического модифицирования газотермических композиционных покрытий, полученных одновременным распылением проволоки из стали аустенитного класса с содержанием никеля не менее $C_{Ni} = 10\%$ и стали мартенситного класса с содержанием углерода более $C_C = 0,4\%$ при соотношении диаметров проволоки $d_{\text{март.ст.}}/d_{\text{ауст.ст.}} = 1,12-1,20$, необходимо использовать прирабочную композицию с числом пенетрации $\Pi = 265-340$ ед. при концентрации алмазно-графитовой шихты в ней $C_{\text{ША-А}} = 0,25-0,35$ масс.%, имеющей размер частиц в пределах $d_{\text{ч}} = 10-50$ нм, а процесс приработки необходимо осуществлять при удельной нагрузке $P = 40-50$ МПа и скорости скольжения $V_{\text{ск}} = 0,20-0,30$ м/с.

Ключевые слова: газотермические покрытия, стали аустенитного и мартенситного классов, трибомеханическое модифицирование, прирабочная композиция, оптимизация режимов приработки, концентрация алмазно-графитовой шихты, удельная нагрузка, скорость скольжения

Введение. Работоспособность машин и механизмов в значительной степени определяется износостойкостью рабочих поверхностей элементов узлов трения. Существует широкая гамма методов инженерии поверхностей, реализация которых позволяет увеличить ресурс узлов трения за счет снижения сил трения в трибосопряжении или повышения износостойкости контактирующих поверхностей. Эти методы базируются либо на удалении поверхностного слоя до требуемого уровня геометрической точности и шероховатости поверхности, либо на изменении структурно-фазового состояния поверхностного слоя. При этом существует множество технологических приемов формирования в поверхностном слое требуемого структурно-фазового состояния материала, либо основанные на различного рода

воздействиях на поверхность (термическое, химико-термическое, электрофизическое, деформационное и др.), либо включающие нанесение на рабочую поверхность пленок или покрытий различными методами (химические, электрохимические, газотермические и др.), либо использующие комбинации первого и второго подходов (например, триботехнологические) [1–5].

В перечисленном ряду технологических приемов улучшения функциональных свойств поверхностей трения следует выделить методы триботехнологии, реализация которых связана с формированием покрытий или изменением структурно-фазового состояния поверхностного слоя детали непосредственно в процессе трибовзаимодействия либо на специально выделенной операции изготовления детали (финишная анти-

фрикционная безабразивная обработка), либо на стадии приработки узла трения (использование приработочных составов), либо в процессе штатной эксплуатации машин и механизмов (например, использование металлоплакирующих смазочных материалов, полимерсодержащих композиций и др.) [6, 7]. Особенно привлекательно использование двух последних подходов, поскольку они позволяют существенно сократить расходы на изготовление элементов трения, совместив финишные операции обработки их рабочих поверхностей с этапом эксплуатации машины или механизма.

К числу приработочных композиций можно отнести смазочные материалы, содержащие в своем составе наноразмерные сверхтвердые добавки (например, наноразмерные частицы алмаза или алмазно-графитовой шихты), которые в процессе трения, попадая в зону трибоконтакта, инициируют эффект трибомеханического модифицирования поверхностей трения, который может проявляться посредством нескольких механизмов. Один из них состоит в диспергировании зеренного строения поверхностного слоя материала вследствие интенсивной пластической деформации под воздействием сверхтвердых нанокомпонентов смазочного материала и, как следствие, формировании в поверхностном слое наноразмерной ячеистой субзеренной структуры, характеризующейся повышенной износостойкостью [8]. Реализация другого механизма влияния деформационного воздействия при трении на свойства поверхностных слоев связана с фазовыми превращениями и требует наличия в поверхностных слоях метастабильных фаз. Применительно к сталям такой фазой может являться остаточный аустенит. В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит, имеющий твердость $HV = 2000\text{--}3000$ МПа, трансформируется в твердый ($HV = 7000\text{--}8000$ МПа) и износостойкий мартенсит деформации за счет протекания деформационно-инициируемого $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Образующиеся в результате интенсивного деформационного воздействия при трении мартенситные фазы обладают высокой твердостью, усталостной прочностью и износостойкостью, что существенно повышает триботехнические свойства элементов пар трения. При этом твердость приработанной поверхности трения выходит на уровень, недостижимый при обычных методах обработки покрытий [9].

Характер протекания процесса трибомеханического модифицирования зависит от целого ряда факторов, включающих как свойства самих материалов, из которых изготовлены элементы трибосопряжения, и параметры шероховатости поверхности трения, так и режимы трения и характеристики приработочной композиции, включая концентрацию наноразмерного сверхтвердого

модификатора в ней. Эффективность процесса трибомеханического модифицирования обычно оценивается по уровню повышения твердости (износостойкости) поверхности трения, степени снижения коэффициента трения и продолжительности стадии приработки трибосопряжения, фиксируемой по наступлению стабилизации коэффициента трения [9]. Определение оптимальных режимов приработки узлов трения и выбор состава приработочной композиции является важной технологической задачей для процессов триботехнологии, и ее решение может в значительной степени повысить эффективность производства и использования широкого спектра машин и механизмов.

Газотермические стальные покрытия нашли широкое применение в машиностроении и ремонтном производстве для упрочнения и восстановления деталей машин. В работе [10] было отмечено заметное проявление эффекта трибомеханического модифицирования в газотермических стальных покрытиях, имеющих в своем составе большое содержание (до 70 об.%) остаточного аустенита, который при деформационной обработке покрытия может трансформироваться в мартенсит деформации со всеми вытекающими из этого положительными, с точки зрения износостойкости покрытия, проявлениями. Однако влияние множества факторов на процесс трансформации структурно-фазового состояния поверхностного слоя материала при трибомеханической обработке затрудняет выбор оптимальных режимов приработки.

В связи с этим цель настоящей работы заключалась в установлении количественной взаимосвязи между основными показателями модифицирования газотермических стальных покрытий, содержащих в своем составе остаточный аустенит, (твердость, коэффициент трения, продолжительность приработки) от режимов трибомеханической обработки (давление, скорость относительного перемещения) и состава приработочной композиции (концентрация наноразмерной алмазно-графитовой шихты).

Методика и объекты исследований. Анализ результатов, полученных в работе [11], показал, что для формирования покрытий с количеством остаточного аустенита в пределах 45–60% необходимо, чтобы в качестве материала одной из проволок использовалась высокохромистая сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее $C_{Ni} = 10\%$, в качестве другой проволоки — высокохромистая сталь мартенситного класса с содержанием углерода более $C_C = 0,4\%$, причем ее диаметр должен быть в 1,12–1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса. В качестве основы приработочной композиции рекомендуется пластичная смазка с числом пенетрации П от 265 до 340.

Обработка состава смазочного материала и режимов приработки осуществлялась на основе анализа процессов трибологического контактирования элементов узлов трения в присутствии модифицированных пластичных смазок, оценки особенностей взаимодействий наночастиц добавки с волокнами дисперсной фазы пластичных смазок и экспериментальных данных по исследованию структурного состояния (размер субзерен) и свойств (твердость, износостойкость) поверхностных слоев газотермических покрытий после приработки поверхности трения, на основе анализа реологических характеристик смазочного материала и оценкой экономической составляющей трибомеханической обработки.

Оптимизация режимов трибомеханической обработки газотермических покрытий и состава приработочной композиции осуществлялась с использованием метода математического планирования эксперимента с учетом предварительно полученных экспериментальных данных. Материалом покрытия являлся композит состава «сталь 90X18MФ — сталь 12X18H12Т», полученный газотермическим распылением проволок из мартенситной (90X18MФ) и аустенитной (12X18H12Т) сталей с соотношением диаметров проволок $D_1/D_2 = 1,20$. Исходная шероховатость поверхности — $Ra = 0,63–0,80$ мкм. Основа приработочной композиции — пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87), число пенетрации — 300 ед. Модифицирующая добавка — алмазно-графитовая шихта ША-А (ТУ РБ 1000561180.003-2003), размер частиц $d_q = 10–50$ нм. Характеристика контртела: материал — сталь У8, твердость 64–65 HRC, исходная шероховатость поверхности $Ra = 0,63–0,80$ мкм. Схема трибоконтакта — возвратно-поступательное перемещение контактирующих тел. Параметрами оптимизации являлись: концентрация добавки ША-А в смазке ($C_{\text{ША-А}} = 0,10–0,60$ масс.%, давление в зоне трибоконтакта $P = 20–60$ МПа и скорость скольжения в зоне трибоконтакта $V_{\text{ск}} = 0,10–0,40$ м/с. В качестве критериев оптимизации выступали коэффициент трения f (min), твердость HV , МПа (max), путь трения при приработке L , м (min).

Результаты исследований и их обсуждение. Одной из важнейших задач технологического процесса трибомеханической обработки является обеспечение заданных характеристик их качества наиболее производительным путем при минимальных затратах. Отсюда следует заключение о необходимости использования критериев оптимизации — минимальной себестоимости и максимальной производительности процесса, обеспечивающего требуемые физико-механические свойства материала. В связи с этим для разработки математической модели процесса трибомеханической обработки газотермичес-

ких стальных покрытий потребовалось установить зависимость минимального коэффициента трения f , максимальной твердости HV и минимального пути трения при приработке L покрытия от следующих факторов: концентрация добавки шихты ША-А $C_{\text{ША-А}}$, масс.%; давления в контакте P , МПа; скорость скольжения $V_{\text{ск}}$, м/с.

Для обоснованного выбора технологических режимов трибомеханической обработки газотермических стальных покрытий, а также сокращения продолжительности и объема испытаний были использованы методы математического планирования эксперимента [12]. Это позволило обеспечить заданные характеристики модифицированных покрытий наиболее производительным путем при минимальных затратах.

Математическая модель уравнения отклика от независимых переменных с учетом эффектов их взаимодействий и ошибки эксперимента была представлена в виде полинома второй степени

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

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.

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) проводили трибомеханическое модифицирование газотермических стальных покрытий и измеряли значения коэффициента трения, твердости и пути приработки. Значения Y_f, Y_{HV} и Y_L , указанные в таблице 2, получены как средние из трех измерений.

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

$$Y_f = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (2)$$

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 1 – Levels and intervals of factors variation

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основной 0	верхний +1	нижний -1
Концентрация добавки ША-А $C_{\text{ША-А}}$, масс. %	x_1	0,25	0,35	0,60	0,10
Давление в контакте P , МПа	x_2	20	40	60	20
Скорость скольжения $V_{\text{ск}}$, м/с	x_3	0,15	0,25	0,40	0,10

Коэффициенты модели вычисляли по приведенным в [12] формулам

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

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

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

$$b_0 = 0,08; \quad b_1 = 0,0375; \quad b_2 = 0,02875; \quad b_3 = 0,006;$$

$$b_{12} = 0,038; \quad b_{13} = 0,033; \quad b_{23} = 0,015;$$

$$b_{11} = 0,0150; \quad b_{22} = 0,0825; \quad b_{33} = 0,0475.$$

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

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, вычисляли по приведенным в [12] формулам при числе факторов $k = 3$. Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s^2\{Y_{HV}\} = 0,000033;$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s^2\{Y_{HV}\} = 0,000013;$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4} s^2\{Y_{HV}\} = 0,000025;$$

$$s^2\{b_{ij}\} = \frac{13}{48} s^2\{Y_{HV}\} = 0,000027.$$

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

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\} = \pm 0,0118,$$

где t_T – табличное значение критерия Стьюдента; при числе степеней свободы f равном 30 и 5%-ном 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.

Аналогично определяем доверительные интервалы коэффициентов b_p, b_{ip}, b_{ii} :

Таблица 2 – Матрица планирования и результаты опытов
Table 2 – Planning matrix and results of experiments

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y_f	Y_{HV} , МПа	Y_L , ГПа
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,28	6250	1740
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,18	5500	2420
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,10	4950	2470
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,15	4380	2910
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	6520	1550
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,21	6300	1610
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,12	6250	2090
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,10	5380	2060
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,14	4580	2610
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09	6390	1600
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,27	6120	1500
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,24	5910	1710
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,15	5150	2160
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,18	5360	3020
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	6470	1640

Таблица 3 – Вспомогательная таблица для расчета $s^2\{Y_{Hf}\}$
 Table 3 – Supporting table for calculation $s^2\{Y_{Hf}\}$

Номер опыта в центре плана	Y_f	\bar{Y}_f	$Y_f - \bar{Y}_f$	$(Y_f - \bar{Y}_f)^2$
5	0,07	0,08	-0,0100	0,000100
10	0,09		0,0100	0,000100
15	0,08		0,0000	0,000000
$s^2\{Y_f\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{0,0002}{3 - 1} = 0,0001$				$s_E = \sum(Y_f - \bar{Y}_f)^2 = 0,0002$

$$\Delta b_{i1} = \pm t_T s\{b_{i1}\} = \pm 0,0072;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 0,0102;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 0,0106.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Коэффициенты b_{13} и b_{23} меньше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. Тогда уравнение регрессии (2) получает вид:

$$Y_f = 0,08 + 0,0375x_1 + 0,02875x_2 + 0,038x_1x_2 + 0,033x_1x_3 + 0,01x_2x_3 + 0,0150x_1^2 + 0,0825x_2^2 + 0,0475x_3^2. \quad (3)$$

Адекватность полученной модели проверяем по F -критерию Фишера. Для вычисления дисперсии $s^2_{ад}$ адекватности находим сумму s_R квадратов отклонений расчетных значений \hat{Y}_f от экспериментальных значений Y_f во всех точках плана (таблица 4). Расчетные значения \hat{Y}_f определяем по выражению (3), $s_E = 0,0002$ (см. таблицу 3).

Находим дисперсию:

$$s^2_{ад} = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{0,0047 - 0,000200}{15 - 9 - (3 - 1)} = 0,001134,$$

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

Дисперсия $s^2\{Y_f\} = 0,0001$ (см. таблицу 3), поэтому расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{s^2_{ад}}{s^2\{Y_f\}} = 11,34.$$

Табличное значение F -критерия при 5%-ном уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 4$, меньшей дисперсии $m_2 = n_0 - 1 = 2$, $F_T = 19,37$. Так как $F_p < F_T$, полученная модель (3) адекватна при 5%-ном уровне значимости.

Анализ уравнения (3) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение фактора x_1 в большей степени влияет на увеличение значений коэффициента

трения, 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 (C, P, V). Для этого использовали следующие формулы:

$$x_1 = \frac{C - C_0}{\Delta C}; \quad x_2 = \frac{P - P_0}{\Delta P}; \quad x_3 = \frac{V - V_0}{\Delta V},$$

где C_0, P_0, V_0 – натуральные значения факторов на основных уровнях; $\Delta C, \Delta P, \Delta V$ – значения интервалов варьирования.

Таким образом, в соответствии с таблицей 1

$$x_1 = \frac{C - 0,35}{0,25}; \quad x_2 = \frac{P - 40}{20}; \quad x_3 = \frac{V - 0,25}{0,15}.$$

Таблица 4 – Вспомогательная таблица для вычисления s_R
 Table 4 – Supporting table to calculate s_R

Номер опыта	Y_f	\hat{Y}_f	\hat{Y}_f	$Y_f - \hat{Y}_f$
1	0,28	0,2813	-0,0013	0,000002
2	0,18	0,1488	0,0312	0,000977
3	0,10	0,1313	-0,0313	0,000977
4	0,15	0,1488	0,0012	0,000002
5	0,07	0,0800	-0,0100	0,000100
6	0,21	0,2125	-0,0025	0,000006
7	0,12	0,1475	-0,0275	0,000756
8	0,10	0,0725	0,0275	0,000756
9	0,14	0,1375	0,0025	0,000006
10	0,09	0,0800	0,0100	0,000100
11	0,27	0,2538	0,0163	0,000264
12	0,24	0,2238	0,0163	0,000264
13	0,15	0,1663	-0,0163	0,000264
14	0,18	0,1963	-0,0163	0,000264
15	0,08	0,0800	0,0000	0,000000
$s_R = \sum(Y_f - \hat{Y}_f)^2 = 0,0047$				

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

$$Y_f = 0,69474 - 0,542 \cdot C - 0,0189725 \cdot P - 1,558 \cdot V + 0,0076 \cdot C \cdot P + 0,88 \cdot C \cdot V + 0,005 \cdot P \cdot V + 0,24 \cdot C^2 + 0,00020625 \cdot P^2 + 2,11 \cdot V^2. \quad (4)$$

Аналогично получено уравнение регрессии для Y_{HV} :

$$Y_{HV} = 6460 + 626,25x_1 + 355x_2 + 106,25x_3 - 187,50x_1x_3 + 105x_2x_3 - 598,75x_1^2 - 591,25x_2^2 - 233,75x_3^2. \quad (5)$$

Полученная модель адекватна при 5%-ном уровне значимости, так как

$$F_p = \frac{s_{ал}^2}{s^2\{Y_{HV}\}} = 6,22 < F_T = 19,37.$$

После перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) факторов к натуральным значениям (C, P, V) уравнение (5) примет вид:

$$Y_{HV} = 420,817 + 10461 \cdot C + 127,25 \cdot P + 6252,74 \cdot V - 5000 \cdot C \cdot V + 35 \cdot P \cdot V - 9580 \cdot C^2 - 1,478 \cdot P^2 - 10388,8 \cdot V^2. \quad (6)$$

Анализ уравнения (6) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение фактора x_1 также в большей степени влияет на увеличение показателя твердости, чем факторы x_2 и x_3 , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (6) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор x_1 .

Аналогично получено уравнение регрессии для Y_L :

$$Y_L = 1596,67 - 273,75x_1 - 386,25x_2 - 262,5x_3 - 60x_1x_2 + 162,5x_2x_3 + 391,67x_1^2 + 396,67x_2^2 + 104,17x_3^2. \quad (7)$$

Полученная модель адекватна при 5%-ном уровне значимости, так как

$$F_p = \frac{s_{ал}^2}{s^2\{Y_L\}} = 12,24 < F_T = 19,37.$$

После перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) факторов к натуральным значениям (C, P, V) уравнение (7) примет вид:

$$Y_L = 6207,2942 - 5001,704 \cdot C - 107,9881 \cdot P - 6231,48 \cdot V - 12 \cdot C \cdot P + 54,16 \cdot P \cdot V + 6266,72 \cdot C^2 + 0,9916 \cdot P^2 + 4629,7 \cdot V^2. \quad (8)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение фактора x_1 также в большей степени влияет на увеличение показателя пути трения, чем факторы x_2 и x_3 , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (4) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор x_1 .

Уравнения регрессии (4), (6) и (8) можно использовать для выбора технологических режимов трибомеханического модифицирования газотермических стальных покрытий, обеспечивающих оптимальные значения коэффициента трения f , твердости HV и пути трения при приработке L в зависимости от исследуемых факторов ($C_{\text{ША-А}}, P, V_{\text{ск}}$). На рисунках 1–3 представлены полученные с помощью уравнений (4), (6) и (8) графические зависимости коэффициента трения, твердости покрытия и пути трения при приработке от исследуемых факторов. При построении поверхности откликов (программа SigmaPlot 12) варьировались только два фактора.

Анализ приведенных на рисунках 1–3 данных показывает, что в случае использования приработочного состава с концентрацией алмазно-графитовой шихты в пределах $C_{\text{ША-А}} = 0,25–0,50$ масс.% процесс приработки протекает достаточно интенсивно, и уже после пути трения $L = 1000–1500$ м наступает стабилизация коэффициента трения. При использовании приработочной композиции с концентрацией алмазно-графитовой шихты $C_{\text{ША-А}} < 0,25$ масс.% продолжительность процесса приработки рабочей поверхности газотермического покрытия чрезвычайно велика. Это обусловлено недостаточным

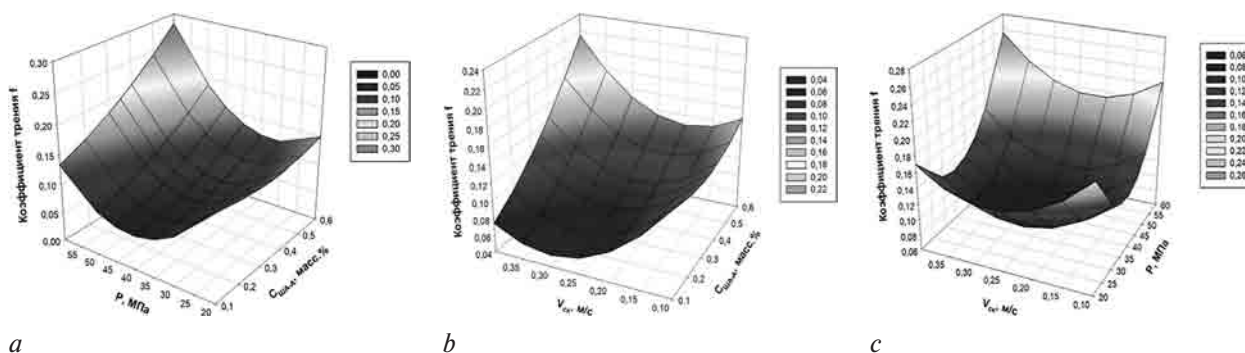


Рисунок 1 — Зависимость коэффициента трения f исследуемых факторов процесса: a — концентрации добавки $C_{\text{ША-А}}$ и давление в контакте P (при $V_{\text{ск}} = 0,25$ м); b — концентрация добавки $C_{\text{ША-А}}$ и скорость скольжения $V_{\text{ск}}$ (при $P = 40$ МПа); c — давление в контакте P и скорость скольжения $V_{\text{ск}}$ (при $C_{\text{ША-А}} = 0,35$ масс.%)

Figure 1 — Dependence of friction coefficient f on studied process factors: a — concentration of $C_{\text{ША-А}}$ additive and contact pressure P (at $V_{\text{sl}} = 0,25$ m); b — concentration of $C_{\text{ША-А}}$ additive and sliding velocity V_{sl} (at $P = 40$ МПа); c — contact pressure P and sliding velocity V_{sl} (at $C_{\text{ША-А}} = 0,35$ wt.%)

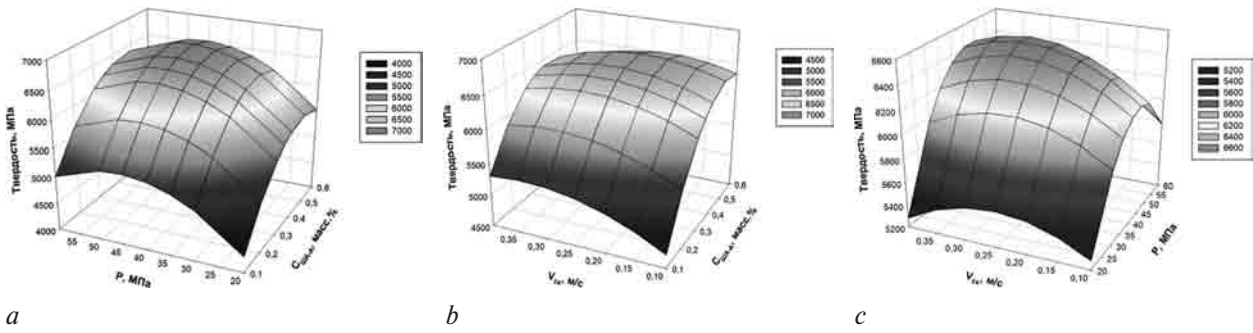


Рисунок 2 — Зависимость твердости HV от исследуемых факторов процесса: *a* — концентрации добавки $C_{\text{ША-А}}$ и давление в контакте P (при $V_{\text{ск}} = 0,25$ м); *b* — концентрация добавки $C_{\text{ША-А}}$ и скорость скольжения $V_{\text{ск}}$ (при $P = 40$ МПа); *c* — давление в контакте P и скорость скольжения $V_{\text{ск}}$ (при $C_{\text{ША-А}} = 0,35$ масс.%)

Figure 2 — Dependence of hardness HV on studied process factors: *a* — concentration of $C_{\text{ША-А}}$ additive and contact pressure P (at $V_{\text{sl}} = 0,25$ m); *b* — concentration of $C_{\text{ША-А}}$ additive and sliding velocity V_{sl} (at $P = 40$ МПа); *c* — contact pressure P and sliding velocity V_{sl} (at $C_{\text{ША-А}} = 0,35$ wt.%)

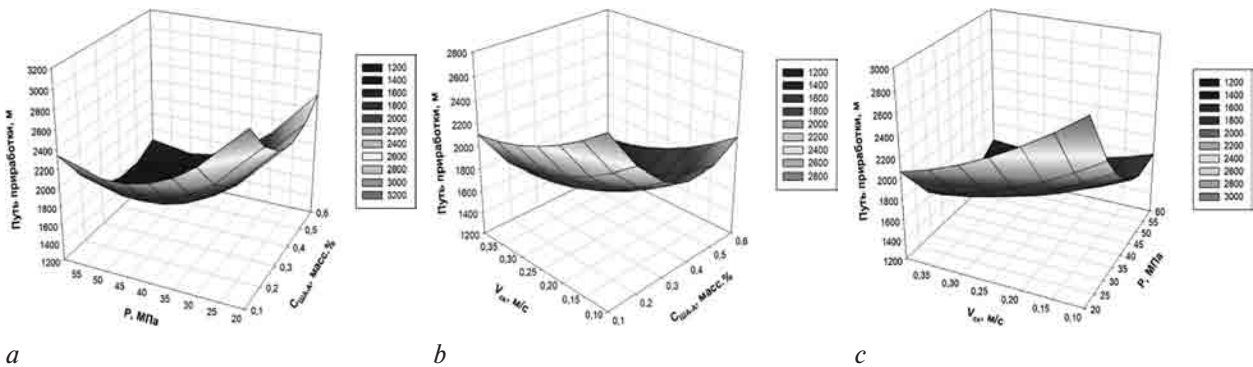


Рисунок 3 — Зависимость пути трения при приработке L от исследуемых факторов процесса: *a* — концентрации добавки $C_{\text{ША-А}}$ и давление в контакте P (при $V_{\text{ск}} = 0,25$ м); *b* — концентрация добавки $C_{\text{ША-А}}$ и скорость скольжения $V_{\text{ск}}$ (при $P = 40$ МПа); *c* — давление в контакте P и скорость скольжения $V_{\text{ск}}$ (при $C_{\text{ША-А}} = 0,35$ масс.%)

Figure 3 — Dependence of friction path at running-in L on studied process factors: *a* — concentration of $C_{\text{ША-А}}$ additive and contact pressure P (at $V_{\text{sl}} = 0,25$ m); *b* — concentration of $C_{\text{ША-А}}$ additive and sliding velocity V_{sl} (at $P = 40$ МПа); *c* — contact pressure P and sliding velocity V_{sl} (at $C_{\text{ША-А}} = 0,35$ wt.%)

содержанием в приработочном составе сверхтвердых частиц, обеспечивающих проявление эффекта трибомеханического модифицирования поверхности трения. При концентрации алмазно-графитовой шихты в смазке $C_{\text{ША-А}} > 0,50$ масс.% на начальной стадии происходит резкое снижение коэффициента трения, однако через некоторое время наблюдается столь же резкое его увеличение с последующим наступлением задира. Это, вероятно, связано с чрезмерно повышенной вязкостью смазочной композиции при таком содержании в ней модификатора, ухудшением подтекания смазочного состава в зону трибоконтакта и нарушением условий смазывания пары трения. Наряду с этим повышенное содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции приводит к существенному увеличению стоимости последней.

Наиболее эффективно процесс трибомодифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок $p = 40\text{--}50$ МПа при скорости скольжения $V_{\text{ск}} = 0,20\text{--}0,35$ м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне $f = 0,06\text{--}0,09$ наступает после приработ-

ки на пути трения $L = 1480\text{--}1860$ м, а твердость поверхностного слоя при этом увеличивается на 50–70%. При давлениях $p < 40$ МПа стадия приработки протекает на пути трения более $L = 3000$ м, и при этом повышение твердости поверхности составляет не более 10–25%, а коэффициент трения стабилизируется на уровне $f = 0,10\text{--}0,12$. При давлениях $p > 50$ МПа уже на стадии приработки начинают проявляться явления задира с резким возрастанием коэффициента трения, обусловленные выдавливанием смазочного материала из зоны трения.

Скорость скольжения в меньшей степени, чем удельная нагрузка, оказывает влияние на протекание процессов модифицирования поверхности. Однако при значениях скорости скольжения $V_{\text{ск}} < 0,20$ м/с отмечено замедленное протекание процессов приработки поверхности трения, которые завершаются после пути трения более $L = 2500$ м с фиксацией коэффициента трения на уровне $f = 0,09\text{--}0,11$ и повышением твердости поверхности покрытия на 30–40%. В случае проведения приработки при скорости скольжения $V_{\text{ск}} > 0,35$ м/с наблюдается резкое повышение коэффициента трения, обусловленное, по всей

Таблица 5 — Режимы процесса трибомеханического модифицирования и показатели качества приработки
 Table 5 — Modes of tribomechanical modification process and quality indicators of running-in

Наименование технологических параметров и критериев качества	Значения технологических параметров и критериев качества	
	расчетные	фактические
Концентрация добавки ША-А $C_{\text{ША-А}}$, масс. %	0,30±0,05	0,25
Давление в контакте P , МПа	45±5	45
Скорость скольжения $V_{\text{ск}}$, м/с	0,25±0,05	0,30
Коэффициент трения f	0,06–0,08	0,07–0,08
Твердость HV , МПа	5900–6200	5970–6120
Путь трения L , м	1500–1700	1580–1650

видимости, процессами разрушения дисперсной фазы пластичного смазочного материала и вытеканием последнего из зоны трибоконтакта с последующим появлением задиrow на поверхностях трения.

Таким образом, на основании результатов расчетно-экспериментального моделирования можно заключить, что для обеспечения оптимального сочетания показателей трибомеханического модифицирования газотермических покрытий из композиции мартенситной и аустенитной сталей (коэффициент трения $f = 0,06–0,08$, твердость $HV = 5900–6200$ МПа, путь трения $L = 1500–1700$ м) режимы приработки должны входить в следующие диапазоны: концентрация добавки шихты ША-А $C_{\text{ША-А}} = 0,30±0,05$ масс.%; давление в контакте $P = 45±5$ МПа; скорость скольжения $V_{\text{ск}} = 0,25±0,05$ м/с.

Проверка адекватности полученной математической модели, проведенная по результатам трибомеханического модифицирования газотермического стального покрытия на режимах, представленных в таблице 5, показала, что значения показателей качества (коэффициент трения, твердость, путь трения) укладываются в заданные моделью диапазоны.

Заключение. Таким образом, с использованием метода расчетно-экспериментального моделирования разработана математическая модель процесса трибомеханического модифицирования газотермических стальных покрытий, позволяющая выбирать оптимальные режимы приработки в зависимости от заданных показателей поверхности трения после трибомеханической обработки. При этом в качестве параметров оптимизации выступают концентрация наноразмерной добавки в прирабочной композиции, давление в контакте и скорость скольжения, а критериями оптимизации являются коэффициент трения, твердость поверхности и путь трения при приработке.

Технология восстановления изношенных поверхностей деталей машин, базирующаяся на операциях газотермического напыления стальных покрытий и их последующей трибомеханической

обработки, должна включать гиперзвуковую металлизацию двумя проволоками. При этом в качестве материала одной из проволок необходимо использовать высокохромистую сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее $C_{\text{Ni}} = 10\%$, а в качестве другой проволоки использовать высокохромистую сталь мартенситного класса с содержанием углерода более $C_{\text{C}} = 0,4\%$, причем ее диаметр в 1,12–1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса. После механической обработки следует процесс приработки в смазочном материале, в качестве которой используется пластичная смазка с числом пенетрации П от 265 до 340 при концентрации алмазно-графитовой шихты $C_{\text{ША-А}} = 0,25–0,35$ масс.%, имеющей размер частиц в пределах $d_{\text{ч}} = 10–50$ нм. Процесс приработки необходимо осуществлять при удельной нагрузке $P = 40–50$ МПа и скорости скольжения $V_{\text{ск}} = 0,20–0,30$ м/с.

Список литературы

1. Повышение ресурса трибосопрежений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. наука, 2012. — 452 с.
2. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко [и др.]. — М.: Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004. — 519 с.
3. Инженерия поверхности конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А.В. Белый [и др.]. — Минск: Беларус. наука, 2017. — 457 с.
4. Wicks, Z.W. Organic coatings. Science and technology / Z.W. Wicks, F.N. Jones, S.P. Pappas. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1994. — Vol. 2. — 438 p.
5. Ильюшенко, А.Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А.Ф. Ильюшенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов. — Минск: Бестпринт, 2005. — 253 с.
6. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазграфитовыми добавками. Ч. 2: Модель разрушения / П.А. Витязь [и др.] // Трение и износ. — 2006. — Т. 27, № 2. — С. 196–200.
7. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Ч. 1: Исследование самоорганизации в гидродинамическом режиме трения / А.С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. — 2001. — Т. 22, № 1. — С. 84–91.
8. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky // Advances in Mechanics Research / ed.: Jeremy M. Campbell. — New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. — Vol. 1. — Pp. 1–78.

9. Жорник, В.И. Исследование процессов упрочнения газотермических покрытий при трении в среде наноконпозиционной смазки / В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко // Актуальные проблемы прочности: материалы междунар. науч. конф.: в 2 т. / ВГТУ; А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Рубаника. — Витебск, 2018. — Т. 1, Гл. 5. — С. 88–110.
10. Восстановление валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоцкого государственного университета. Сер. Промышленность. Прикладные науки. — 2017. — № 11. — С. 79–83.
11. Приработка в композиционных смазках деталей с покрытиями, полученными гиперзвуковой металлизацией / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2016. — Вып. 5. — С. 354–356.
12. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

ZHORNIK Viktor I., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

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

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

PARNITSKY Alexander M.

Junior Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials¹

YALOVIK Alexander P.

Director General²

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²JSC “Neftezhavodmontazh”, Novopolotsk, Republic of Belarus

Received 16 July 2018.

OPTIMIZATION OF CONTENT OF RUNNING-IN COMPOSITION AND REGIMES OF TRIBOMECHANICAL PROCESSING OF GAS-THERMAL STEEL COATINGS

The mathematical model of the process of tribomechanical modification of gas-thermal steel coatings is developed with the use of the method of computational and experimental modeling. This model makes it possible to choose the optimal running-in regimes depending on the given frictional surface parameters after the tribomechanical processing. In this case the optimization parameters are the concentration of the nanosized additive in the running-in composition, the tribocontact pressure and the slip velocity. And the optimization criteria are the friction coefficient, the surface hardness and the friction path in the running-in. It is shown that, for example, with the aim of tribomechanical modification of gas-thermal spray composite coatings produced by the simultaneous spraying of wires from austenitic steels with a nickel content of not less than $C_{Ni} = 10\%$ and the martensitic steel grade with a carbon content of more than $C_C = 0.4\%$ with the ratio of the diameters of the wires $d_{mart.st.}/d_{aust.st.} = 1.12–1.20$, it is necessary to use the running-in composition with a penetration number of $N = 265–340$ units at a concentration of diamond-graphite charge in it $C_{Sh,A-A} = 0.25–0.35$ wt. % having a particle size within $d_p = 10–50$ nm, and the running-in process must be carried out at a specific load $P = 40–50$ MPa and a sliding velocity $V_{sl} = 0.20–0.30$ m/s.

Keywords: gas-thermal coatings, steels of austenitic and martensitic grades, tribomechanical modification, running-in composition, optimization of running-in regimes, concentration of diamond-graphite charge, specific load, sliding velocity

References

1. Vityaz P.A., Zhornik V.I., Belotserkovsky M.A., Levantsevich M.A. Povyshenie resursa tribosopryazheniy aktivirovannymi metodami inzhenerii poverkhnosti [Increasing the lifetime of friction units with activated methods of surface engineering]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 452 p.
2. Lovshenko F.G., et al. Novye resursosberegayushchie tekhnologii i kompozitsionnye materialy [New resource-saving technologies and composite materials]. Moscow, Energoatomizdat Publ., Gomel, BelSUT Publ, 2004. 519 p.
3. Belyy A.V., Kalinichenko A.S., Devoyno O.G., Kukareko V.A. Inzheneriya poverkhnosti konstruksionnykh materialov s ispol-

- zovaniem plazmennykh i puchkovykh tekhnologiy [Surface engineering of structural materials using plasma and beam technologies]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 457 p.
4. Wicks Z.W., Jones F.N., Pappas S.P. *Organic coatings. Science and technology. Vol. 2.* Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 1994. 438 p.
 5. Ilyushchenko A.F., Okovityy V.A., Shevtsov A.I. *Formirovanie iznosostoykikh plazmennykh pokrytiy na osnove kompozitsionnykh samosmazyvayushchikhsya materialov* [Formation of wear-resistant plasma coatings based on composite self-lubricating materials]. Minsk, Bestprint Publ., 2005. 253 p.
 6. Vityaz P.A., Zhornik V.I., Kukareko V.A., Kamko A.I. Formirovanie iznosostoykikh poverkhnostnykh struktur i mekhanizm ikh razrusheniya pri trenii v srede smazochного материала, modifitsirovannogo ultradispersnymi almagrafитовыми добавками. Chast 2. Model razrusheniya [Formation of wear-resistant surface structures and their damage mechanism in friction with lubricant modified by ultra-dispersed diamond-graphite additives. Part 2. Damage model]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2006, vol. 27, no. 2, pp. 196–200.
 7. Kuzharov A.S., Akhverdiev K.S., Kravchik K., Kuzharov A.A. Molekulyarnye mekhanizmy samoorganizatsii pri trenii. Ch. 1. Issledovanie samoorganizatsii v gidrodinamicheskom rezhime treniya [Molecular mechanisms of self-organization during friction. Part I. A study of self-organization under hydrodynamic friction conditions]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2001, vol. 22, no. 1, pp. 84–91.
 8. Zhornik V.I., Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A. Tribo-mechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds. *Advances in Mechanics Research*, 2011, vol. 1, pp. 1–78.
 9. Zhornik V.I., Belotserkovsky M.A., Kukareko V.A. Issledovanie protsessov uprochneniya gazotermicheskikh pokrytiy pri trenii v srede nanokompozitsionnoy smazki [Study of the processes of hardening of gas-thermal coatings during friction in the medium of nanocomposite lubricant]. *Aktualnye problemy prochnosti: v 2 t.* [Topical strength problems: in 2 vol.], 2018, vol. 1, ch. 5, pp. 88–110.
 10. Belotserkovsky M.A., Zhornik V.I., Yalovik A.P., Dudan A.V. Vosstanovlenie valov nanoseniem kombinirovannykh pokrytiy giperzvukovoy metallizatsiei [Restoration of shafts by covering with combined coatings by the means of hypersonic metallization]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki* [Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences], 2017, no. 11, pp. 79–83.
 11. Belotserkovsky M.A., Yalovik A.P., Dudan A.V. Prirabotka v kompozitsionnykh smazkakh detaley s pokrytiyami, poluchennymi giperzvukovoy metallizatsiei [Running in composite lubricants of parts with coatings made with hypersonic metallization]. *Aktualnye voprosy mashinostroeniya: sb. nauch. tr.* [Collection of scientific papers “Topical issues of mechanical engineering], 2016, issue 5, pp. 354–356.
 12. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.