

УДК 620.178.16
DOI 10.17513/snt.39819

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ РОЛИКОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕМПФЕРНОЙ ЛЕНТЫ

¹Лозовая С.Ю., ²Афонин А.Н., ²Рысиков М.С.

¹ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: lozwa@mail.ru;

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, e-mail: aannru@yandex.ru, rysikov.maksim.s@gmail.com

В научном исследовании представлены результаты натурных экспериментов влияния микротвердости на износостойкость поверхности направляющих роликов установки для изготовления демпферной ленты после процесса микроплазменного напыления. Под действием постоянного трения, при прохождении заготовки в виде ленты для формообразования волновых элементов, рабочие поверхности направляющих роликов подвергаются различным видам напряжений, в результате чего их поверхности изнашиваются и деформируются, при подаче заготовки происходит ее перекос и, как следствие низкая точность формообразования волновых элементов. При работе волновые элементы демпфера пружинят, что обеспечивает равномерное усилие сборки в диапазоне допусков сопрягаемых деталей. Использовался центральный композиционный ротatableльный план факторного эксперимента второго порядка. Получены уравнения регрессии микротвердости поверхностей деталей, подвергнутых процессу микроплазменного напыления, в виде зависимостей от величин расстояния между соплом и деталью, и времени напыления. Установлено, что снижение веса роликов без оплавления и с последующим оплавлением с максимальными микротвердостями составило 0,018 и 0,003 г/ч соответственно при напылении самофлюсующимся порошком ПГ-10Н-01. То есть при увеличении максимальной микротвердости напыленных поверхностей с оплавлением на 15% (с 193 до 222 HV) их износостойкость повысилась в 6 раз.

Ключевые слова: микротвердость, износостойкость, направляющие ролики, установки для изготовления демпферной ленты, сопло, время напыления, самофлюсующийся порошок

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE GUIDE ROLLERS OF THE INSTALLATION FOR THE MANUFACTURE OF A DAMPER TAPE

¹Lozovaya S.Yu., ²Afonin A.N., ²Rysikov M.S.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod,
e-mail: lozwa@mail.ru;

²Belgorod National Research University, Belgorod,
e-mail: aannru@yandex.ru, rysikov.maksim.s@gmail.com

The scientific study presents the results of in-situ experiments of the influence of microhardness on the wear resistance of the surface of the guide rollers of the installation for the manufacture of a damping belt after the microplasma sputtering process. Under the effect of constant friction, during the passage of a blank in the form of a strip for forming wave elements, the working surfaces of the guide rollers are subjected to various types of stresses, resulting in wear and deformation of their surfaces, and when the blank is fed, it is skewed, and as a result, the accuracy of the formation of wave elements is low. During operation, the wave elements of the damper spring, which ensures a uniform assembly force in the range of tolerances of the mating parts. The central compositional rotatable plan of the second-order factor experiment was used. The equations for the regression of the microhardness of the surfaces of the parts subjected to the process of microplasma sputtering are obtained in the form of dependencies on the values of the distance between the nozzle and the component and the spraying time. The reduction of roller weight without melting and subsequent melting with maximum microhardness was found to be: 0.018 and 0.003 gr/h, respectively, when the self-flushing powder PG-10N-01 was sprayed. That is, with a 15% increase in the maximum microhardness of the coated surfaces with melting (from 193 to 222 HV), their wear resistance increased by 6 times.

Keywords: microhardness, wear resistance, guide rollers, installations for the manufacture of damping tape, nozzle, spraying time, self-fluxing powder

The work was carried out within the framework of the implementation of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Эксплуатационные характеристики деталей машин и оборудования определяются свойствами и качеством поверхностного слоя их материала. Микроплазменное напыление – один из методов повышения износостойкости поверхностей деталей, где требуется нанесение функциональных покрытий на локальные зоны деталей с высоким коэффициентом использования напыляемого материала [1, 2]. Процесс микроплазменного напыления заключается в расплавлении материала покрытия с последующим нанесением его на основу в газовом потоке. Частицы в расплаве в микроне зоне удара об основу деформируются и растекаются, слипаясь друг с другом, затвердевая, формируют плоский слой. Данный метод характеризуется высокой эффективностью и качеством покрытий, гибкостью регулирования режимов напыления, а также небольшими габаритами оборудования, долговечностью его рабочих элементов, стабильностью работы.

Напыление выполняется при высокой температуре плазменной струи (2100–2300°C) и высокой скорости (до 140 м/с)

движения частиц в струе. Адгезионная прочность сцепления покрытия с поверхностью детали в среднем равна 40–70 МПа на отрыв, а в некоторых случаях – до 120 МПа, пористость покрытия ниже 3,5%. Рекомендуемая толщина покрытия не более 1 мм, так как при ее увеличении в напыляемом слое возникают напряжения, стремящиеся отделить его от поверхности детали [1, 4, 5].

Цель исследования – повысить износостойкость рабочих поверхностей направляющих роликов установки для изготовления демпферной ленты, путем микроплазменного напыления порошком ПГ-10Н-01 с оплавлением и без оплавления; установить с использованием регрессионного анализа экспериментальных исследований влияние основных технологических параметров микроплазменного напыления на твердость напыленных рабочих поверхностей роликов; провести испытания рабочих поверхностей роликов на износостойкость.

Ответственными деталями установки для изготовления демпферной ленты (рис. 1, а) являются направляющие и подающие заготовку ролики (рис. 1, а) [3, 4].

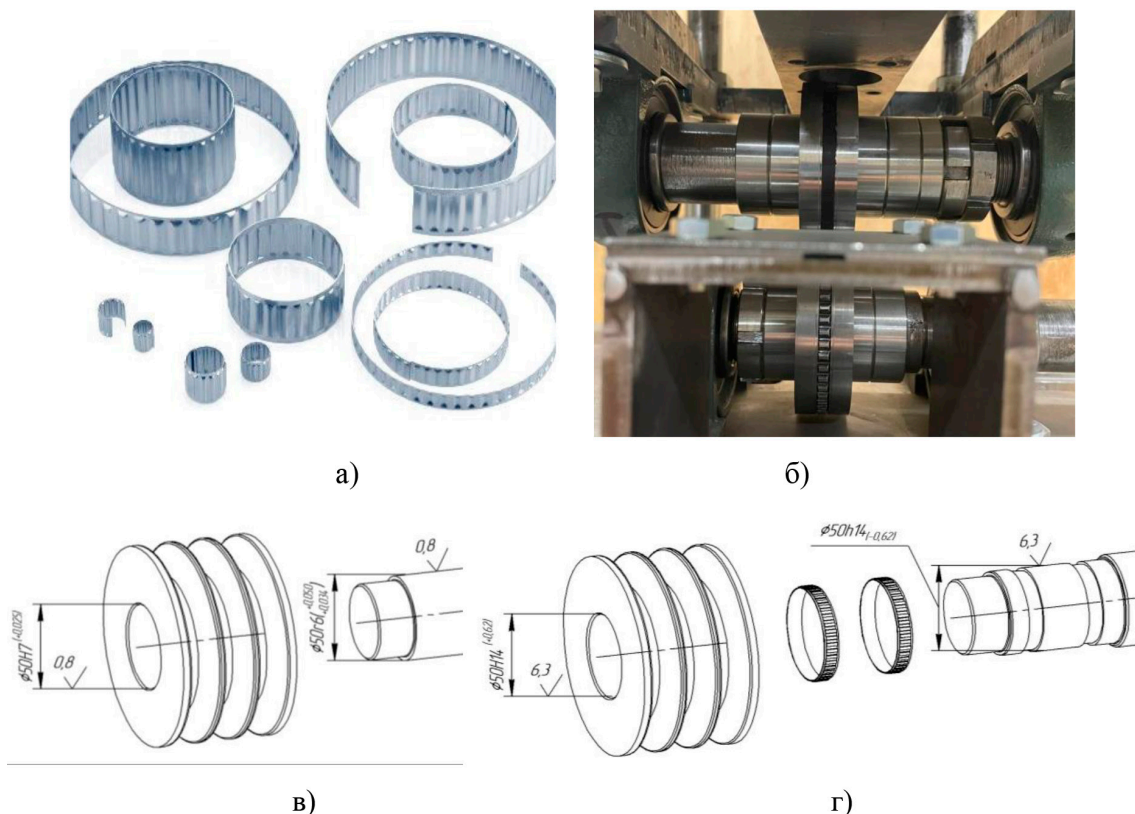


Рис. 1. Разновидности демпферной ленты (а); узел формообразования волновых элементов, полупромышленный образец для экспериментальных исследований (б); крепление шкива на вал в натяг (в); крепление шкива на вал через демпфер (z)

Под действием постоянного трения, при прохождении заготовки в виде ленты для формообразования волновых элементов, рабочие поверхности роликов подвергаются различным видам напряжений, в результате чего их поверхности изнашиваются и деформируются, сминаясь, и, как следствие, при подаче заготовки происходит перекося ленты, а также неточность формообразования волновых элементов.

Демпферные ленты используются для крепления: опор подшипников; статоров в электродвигателях; электродвигателей на ведущих валах; шкивов; зубчатых колес; различных втулок на валы и др. Например, для крепления шкива на вал в натяг необходимо при изготовлении обеспечить допуски втулки $H7 (+0,025 \text{ мм})$, вала $r6 (+0,05...+0,034 \text{ мм})$, которые требуют шлифования сопрягаемых поверхностей (рис. 1, в), а при креплении шкива на вал через демпфер допуски втулки $H14(+0,62 \text{ мм})$, вала $h14 (-0,62 \text{ мм})$, которые обеспечиваются чистой токарной обработкой (рис. 1, г).

При сопряжении между деталями вставляется демпферная лента, далее прилагается радиальное усилие, при котором волновые элементы сминаются, тем самым создается натяг между деталями. При сборке волновые элементы демпфера пружинят, что обеспечивает равномерное усилие сборки в диапазоне допусков сопрягаемых деталей. При этом демпфер снижает усилие, необходимое для сопряжения деталей, по сравнению с запрессовкой почти в три раза. Особо нужно отметить, что демпферное соединение обеспечивает надежное крепление сопрягаемых деталей, выполненных из разных материалов, при работе в сложных температурных условиях. При фиксации двух деталей, которые изготовлены из разных материалов, которые подвергаются термоциклированию, начинают работать волновые элементы как пружины, так

как при изменении температуры материалы деталей сжимаются или расширяются с разной скоростью, что изменяет соответственно натяг или зазор между ними.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились с использованием установки МПН-004. Материалы: металл роликов – сталь 5ХНМ; напыляемый материал – самофлюсующийся порошок ПГ-10Н-01 (температура плавления $1000...1200 \text{ }^\circ\text{C}$) [5, 6].

В качестве основного принят центральный композиционный ротатабельный план полного факторного эксперимента второго порядка как наиболее целесообразный для получения математических моделей при прогнозировании поведения динамических систем [7].

Исследовалось влияние на параметр оптимизации (микротвердость напыленных образцов (HV)) варьирования следующих факторов (табл. 1–3):

– расстояние от детали до сопла

$L = 30...50 \text{ мм}$;

– время напыления $T = 22...38 \text{ с}$.

Получены экспериментальные значения микротвердости напыленных поверхностей образцов (табл. 2, 3). Расчет коэффициентов, декодирование, графическая интерпретация уравнений регрессии производились с использованием аналитического пакета *Maple 13* [7].

Кодирование производилось по формулам

$$x_1 = \frac{L - 40}{10}; x_2 = \frac{T - 30}{8}. \quad (1)$$

Все коэффициенты уравнения по критерию Стьюдента значимы, а коэффициент члена парного взаимодействия при расчете равен нулю, его отсутствие косвенно указывает на то, что уровни варьирования основных факторов были выбраны правильно и полностью охватывают рабочую область.

Таблица 1

Интервалы и уровни варьирования независимых переменных

Уровни	$L, \text{ мм}$		$T, \text{ с}$	
	Натур.	Кодир.	Натур.	Кодир.
Основной	40 мм	0	30 с	0
Интервалы варьиров.	10	–	8	–
Верхний	50	+1	38	+1
Нижний	30	-1	22	-1
Верхняя зв. точка	54	1,414	41	1,414
Нижняя зв. точка	26	-1,414	19	-1,414

Таблица 2

Экспериментальные значения микротвердости поверхностей, напыленных порошком ПГ-10Н-01 толщиной 0,4 мм

Опыт	$x_1 (L, \text{мм})$	$x_2 (T, \text{с})$	$\bar{y}, HV(\text{э})$	$\hat{y}, HV(\text{р})$	%
1	-1 (30)	-1 (22)	189	177	6,4
2	+1 (50)	-1 (22)	183	171	6,5
3	-1 (30)	+1 (38)	193	181	6,1
4	+1(50)	+1 (38)	187	175	6,2
5	-1,414 (26)	0 (30)	199	182	8,6
6	1,414 (54)	0 (30)	180	174	3,4
7	0 (40)	-1,414 (19)	175	171	2,1
8	0 (40)	1,414 (41)	190	177	6,6
9	0 (40)	0 (30)	188	203	7,4
10	0 (40)	0 (30)	188	203	7,4
11	0 (40)	0 (30)	188	203	7,4
12	0 (40)	0 (30)	187	203	7,9
13	0 (40)	0 (30)	189	177	6,4

Таблица 3

Экспериментальные значения микротвердости напыленных порошком ПГ-10Н-01 поверхностей с оплавлением толщиной 0,7 мм

Опыт	$x_1 (L, \text{мм})$	$x_2 (T, \text{с})$	$\bar{y}, HV(\text{э})$	$\hat{y}, HV(\text{р})$	%
1	-1 (30)	-1 (22)	213	219	2,9
2	+1 (50)	-1 (22)	208	218	4,8
3	-1 (30)	+1 (38)	205	206	0,3
4	+1(50)	+1 (38)	214	219	2,1
5	-1,414 (26)	0 (30)	221	225	1,8
6	1,414 (54)	0 (30)	207	217	4,6
7	0 (40)	-1,414 (19)	195	205	5,4
8	0 (40)	1,414 (41)	212	215	1,2
9	0 (40)	0 (30)	213	222	4,0
10	0 (40)	0 (30)	214	222	3,5
11	0 (40)	0 (30)	213	222	4,0
12	0 (40)	0 (30)	215	222	3,1
13	0 (40)	0 (30)	214	222	3,5

Знаки при линейных коэффициентах регрессии x_1 и x_2 показывают, что увеличение времени напыления увеличивает микротвердость, а увеличение расстояния от детали до сопла снижает. При подстановке минимальных и максимальных значений факторов в декодированную модель (3) получаем значения, соответствующие теории

рассматриваемого процесса. Значимость факторов $x_1 = 57\%$ и $x_2 = 43\%$.

Получено уравнение регрессии в кодированном и декодированном видах:

$$HV = 203 - 2.8x_1 + 2.1x_2 - 12.6x_1^2 - 14.4x_2^2; (2)$$

$$HV = 87.7 + 1.8L + 5.1T - 0.02L^2 - 0.09T^2. (3)$$

Функция отклика зависимости микротвердости напыленных поверхностей образцов от изменения основных факторов – параболоид (рис. 2, а). Для удобства определения соотношений основных факторов для получения деталей с необходимой микротвердостью строятся номограммы (рис. 2, б).

Максимальное значение микротвердости, равное 193 *HV*, поверхность изделия приобретает при изменении расстояния от детали до сопла $L = 37 \dots 39$ мм и времени напыления $T = 29 \dots 31$ с. Так, для получения напыленной поверхности изделия с микротвердостью больше или равно 190 *HV* фак-

торы необходимо варьировать в пределах: $L = 32 \dots 43$ мм и $T = 26 \dots 34$ с.

При напылении с оплавлением выдержка при температуре оплавления 1050–1080°C производилась в течение 1,5 мин, что осуществляет удаление оксидов с поверхности частиц покрытия при их оплавлении [4, 6] и позволяет получить плотные покрытия с высокой адгезией с основным материалом, что повышает износостойкость поверхностей в несколько раз.

Получено уравнение регрессии (4) в кодированном виде изменения микротвердости с оплавлением толщиной 0,7 мм:

$$HV = 222 - 3x_1 + 3.3x_2 + 3.5x_1x_2 - 0.4x_1^2 - 5.8x_2^2, \tag{4}$$

$$HV = 186 - 1.3L + 4,1T + 0.04LT - 0.004L^2 - 0.09T^2. \tag{5}$$

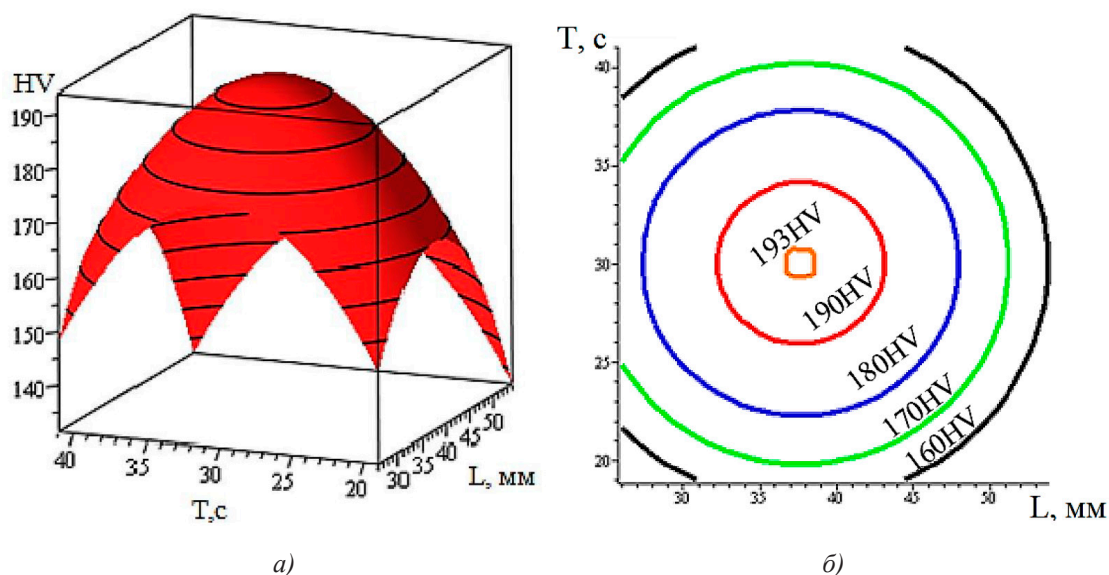


Рис. 2. Графическая интерпретация уравнения регрессии (3) (а); номограммы определения соотношений основных факторов для получения деталей с необходимой микротвердостью поверхности (б)

Все коэффициенты уравнения по критерию Стьюдента значимы. Знаки при линейных коэффициентах регрессии x_1 и x_2 показывают, что увеличение времени напыления увеличивает микротвердость, а увеличение расстояния от детали до сопла снижает. Значимость факторов $x_1 = 48\%$ и $x_2 = 52\%$.

При подстановке минимальных и максимальных значений факторов в декодированную модель (5) получаем значения, соответствующие теории рассматриваемого процесса.

Функция отклика зависимости микротвердости напыленных поверхностей с оплавлением от изменения основных факторов – гиперболоид (рис. 3, а). Для удобства определения соотношений основных факторов для получения деталей с необходимой микротвердостью строятся номограммы (рис. 3, б). Например, любая точка, лежащая в заштрихованной области, будет показывать соотношение значений расстояния от сопла до детали и времени напыления микротвердости поверхности детали от 210 до 215 *HV*.

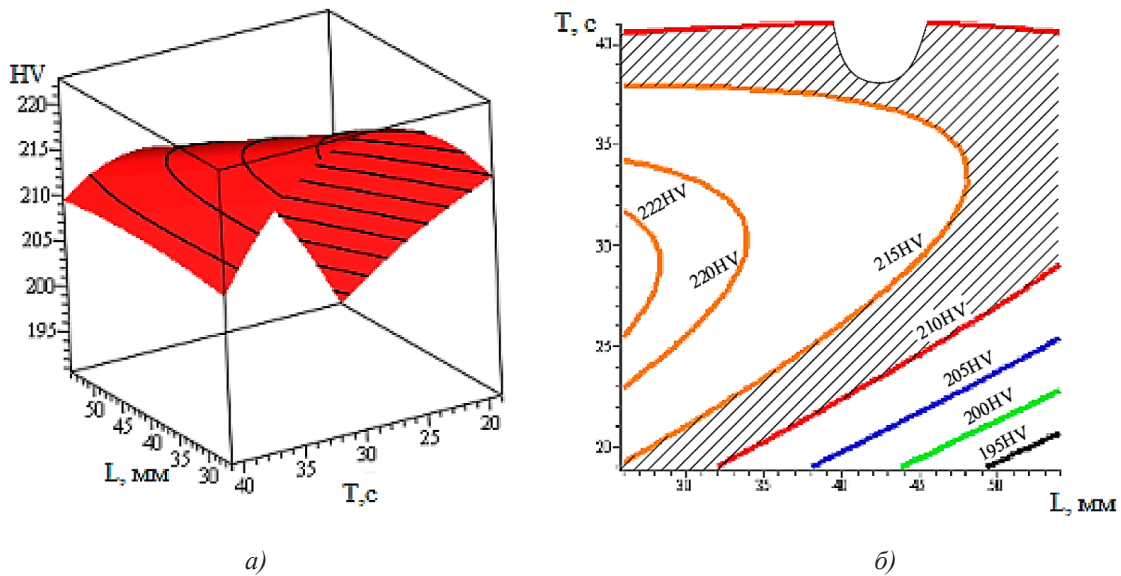


Рис. 3. Графическая интерпретация уравнения регрессии (5);
 номограммы определения соотношений основных факторов для получения деталей
 с необходимой микротвердостью поверхности при напылении с оплавлением (б)

Максимальное значение микротвердости, равное 222 HV , поверхность изделия приобретает при изменении расстояния от детали до сопла $L = 26 \dots 28\text{ мм}$ и времени напыления $T = 25,5 \dots 32\text{ с}$. Так, для получения микротвердости напыленной поверхности изделия большей или равной 220 HV факторы необходимо варьировать в пределах $L = 22 \dots 35\text{ мм}$ и $T = 23 \dots 29\text{ с}$.

Испытания материалов на износостойкость проводились с использованием метода при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы [8].

Заключение

Ответственными деталями установки для изготовления демпферной ленты являются направляющие и подающие заготовку ролики. Под действием постоянного трения, при прохождении заготовки в виде ленты для формообразования волновых элементов, рабочие поверхности роликов подвергаются различным видам напряжений, в результате чего их поверхности изнашиваются и деформируются, сминаясь, и, как следствие, при подаче заготовки происходит перекося ленты, а также неточность формообразования волновых элементов. Поэтому оценка эффективности процесса микроплазменного напыления применительно к конкретному технологическому процессу требует экспериментальных исследований, для определения его рациональных параметров.

Были определены основные факторы и их уровни варьирования, влияющие на микротвердость поверхностей деталей процесса микроплазменного напыления, это расстояние от сопла до детали, $L\text{ мм}$; время напыления, $T\text{ с}$. Установлено, что максимальная микротвердость напыленного слоя, образованного микроплазменным напылением самофлюсующимся порошком ПГ-10Н-01:

– толщиной $0,4\text{ мм}$ равна 193 HV при $L = 37 \dots 39\text{ мм}$ и $T = 29 \dots 31\text{ с}$ без оплавления, значимость факторов распределяется $L = 57\%$ и $T = 43\%$;

– толщиной $0,7\text{ мм}$ равна 222 HV при $L = 26 \dots 28\text{ мм}$ и $T = 25,5 \dots 32\text{ с}$ с оплавлением, значимость факторов распределяется $L = 48\%$ и $T = 52\%$, что не противоречит теории кинетики процесса микроплазменного напыления.

Испытания материалов на износостойкость проводились с использованием метода при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. Установлено, что снижение веса роликов после микроплазменного напыления без оплавления и с последующим оплавлением с максимальными микротвердостями составили $0,018$ и $0,003\text{ г/ч}$ соответственно при напылении самофлюсующимся порошком ПГ-10Н-01. То есть при увеличении максимальной микротвердости напыленных поверхностей с оплавлением на 15% (с 193 до 222 HV) их износостойкость повысилась в 6 раз.

Список литературы

1. Тополянский П.А. Микроплазменное напыление. Особенности технологии и применения // РИТМ машиностроения. 2021. № 3. С. 14–18.
2. Кравченко И.Н., Глинский М.А., Карцев С.В., Корнев В.М., Абдумуминова Д.Т. Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования. М.: Инфра, 2021. 200 с.
3. Рысиков М.С., Лозовая С.Ю., Рутковский А.Ю. Анализ существующего оборудования для создания демпферной ленты // Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии: материалы IV национальной конференции (г. Белгород, 14 мая 2023 г.). Белгород: Издательство Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2023. С. 71–73.
4. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбида вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10. С. 100–115.
5. Сердобинцев Ю.П., Кухтик М.П. Разработка состава и технологии получения самофлюсующегося гетерогенного порошкового материала для нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность втулки подшипника газоперекачивающего агрегата // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 8. С. 72–78.
6. Лузан А.С. Микроструктура и фазовый состав наплавленного покрытия ПГ-10Н-01, модифицированного борсодержащим материалом // Вестник ХНАДУ. 2020. Вып. 88. Т. I. С. 102–106.
7. Лозовая С.Ю., Воронов В.П. Теория, методология и практика обработки научных исследований с использованием информационных технологий (практикум: уч. пособие). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. 224 с.
8. ГОСТ 23.208-79. Группа Т51. Межгосударственный стандарт. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. М.: Указатель стандартов России. 1981. С. 32–35.