

Технология восстановления цилиндрических и винтовых поверхностей транспортера плазменным напылением покрытий

Сергей Ю. Жачкин^{1, 2}zhach@list.ru 0000-0002-1844-5011Григорий И. Трифонов²trifonov_gi@mail.ru 0000-0002-7739-5587Галина Н. Егорова³egorovahp@gmail.com 0000-0002-9907-9649

1 Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

2 Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54А, г. Воронеж, 394064, Россия

3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В условиях серьезной загруженности отечественных предприятий, в особенности ремонтно-восстановительных центров и цехов, особо важной задачей становится совершенствование процесса различных машин и технологий по их восстановлению. Так, на современном этапе особую актуальность приобретает создание новых технологий, обеспечивающих качественное восстановление изношенных поверхностей деталей, а также создание композитных покрытий с необходимыми эксплуатационными свойствами. С экономической точки зрения данный вопрос весьма остро стоит в рамках государственной программы импортозамещения, поскольку как показывает практика, срок службы восстановленных деталей машин достигает уровня новых, при этом стоимость таких деталей в разы меньше. В работе представлены результаты исследований, направленные на получение технологических режимов плазменного напыления как для винтовых, так и для цилиндрических поверхностей детали (шнека) при его восстановлении. Проведен корреляционный анализ полученных данных по влиянию режимов напыления на адгезию покрытия с целью выявления мультиколлинеарных связей. Также проведен регрессионный анализ, по итогам которого были получены уравнения, которые описывают влияние на адгезию покрытия режимов напыления. Представлена графическая интерпретация полученных зависимостей в виде функций желательности, что позволило оценить характер и степень влияния режимов напыления на значения адгезии получаемого покрытия. Кроме того, используя существующие программные комплексы, были получены диапазоны единых технологических режимов для напыления рабочих поверхностей шнека. Проведены измерения твердости и износостойкости покрытия. Полученные результаты проведенного исследования позволяют рекомендовать технологические режимы с назначенным составом материала напыления для восстановления изношенных поверхностей шнеков транспортирующих конвейеров, которые весьма активно используются в авиа- и машиностроении.

Ключевые слова: восстановление, плазменное напыление, композитное покрытие, технологические режимы, адгезия, твердость, износостойкость.

Technology of restoration of cylindrical and screw surfaces of the conveyor by plasma spraying of coatings

Sergey Yu. Zhachkin^{1, 2}zhach@list.ru 0000-0002-1844-5011Grigory I. Trifonov²trifonov_gi@mail.ru 0000-0002-7739-5587Galina N. Egorova³egorovahp@gmail.com 0000-0002-9907-9649

1 Voronezh State Agrarian University, 1 Michurina str., Voronezh, 394087, Russia

2 The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54A Starye Bolshevikov str., Voronezh, 394064, Russia

3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av. 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. In conditions of serious workload of domestic enterprises, especially repair and restoration centers and workshops, improving the process of various machines and technologies for their restoration becomes a particularly important task. Thus, at the present stage, the creation of new technologies that provide high-quality restoration of worn surfaces of parts, as well as the creation of composite coatings with the necessary performance properties, is of particular relevance. From an economic point of view, this issue is very acute within the framework of the state import substitution program, since, as practice shows, the service life of restored machine parts reaches the level of new ones, while the cost of such parts is several times lower. The paper presents the results of research aimed at obtaining technological modes of plasma spraying for both helical and cylindrical surfaces of a part (screw) during its restoration. A correlation analysis of the obtained data on the effect of spraying modes on coating adhesion was carried out in order to identify multicollinear relationships. A regression analysis was also carried out, as a result of which equations were obtained that describe the effect of spraying modes on the adhesion of the coating. A graphical interpretation of the obtained dependencies in the form of desirability functions is presented, which made it possible to evaluate the nature and degree of influence of spraying modes on the adhesion values of the resulting coating. In addition, using existing software systems, ranges of uniform technological modes for spraying the working surfaces of the screw were obtained. The hardness and wear resistance of the coating were measured. The results of the study allow us to recommend technological modes with the prescribed composition of the spraying material for restoring worn surfaces of the screws of transport conveyors, which are very actively used in aircraft and mechanical engineering.

Keywords: restoration, plasma spraying, composite coating, technological modes, adhesion, hardness, wear resistance.

Для цитирования

Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Егорова Г.Н. Технология восстановления цилиндрических и винтовых поверхностей транспортера плазменным напылением покрытий // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 17–24. doi:10.20914/2310-1202-2024-2-17-24

For citation

Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Egorova G.N. Technology of restoration of cylindrical and screw surfaces of the conveyor by plasma spraying of coatings. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 17–24. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-2-17-24

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В условиях серьезной загруженности отечественных предприятий, в особенности ремонтно-восстановительных центров и цехов, особо важной задачей становится совершенствование процесса различных машин и технологий по их восстановлению. Так, на современном этапе особую актуальность приобретает создание новых технологий, обеспечивающих качественное восстановление изношенных поверхностей деталей, а также создание композитных покрытий с необходимыми эксплуатационными свойствами. С экономической точки зрения данный вопрос весьма остро стоит в рамках государственной программы импортозамещения, поскольку как показывает практика, срок службы восстановленных деталей машин достигает уровня новых, при этом стоимость таких деталей в разы меньше.

Ярким представителем интенсивно изнашиваемого агрегата промышленного оборудования является транспортирующий шнековый конвейер, у которого главный элемент конструкции, подвергаемый наибольшему износу – шнек. Так, известно [1–5], что завод изготовитель закладывает ресурс при производстве транспортирующих шнеков, который составляет до 350 часов, однако, условия эксплуатации, которые весьма активно воздействуют на рабочие поверхности вала шнека и его винтовую поверхность, снижают данный показатель и, как правило, ресурс работы шнека достигает до 170 часов. Возникает необходимость в его внеплановой замене, а поскольку завод изготовитель, согласно срокам гарантийного ремонта, может поставлять лишь один шнек на замену после его отработки, то возникают внеплановые экономические затраты на покупку нового шнека, цена которого в среднем достигает до 35 тысяч рублей, при этом стоит учитывать стоимость проведения ремонтно-восстановительных работ.

Следовательно, возникает задача по восстановлению и упрочнению цилиндрической и винтовой поверхностей шнека с целью повышения сроков службы промышленного конвейера, а также для сохранения финансовых активов производства.

Цель работы – разработать технологию восстановления цилиндрической и винтовой поверхностей шнека на основе плазменного напыления композитных покрытий с высокими показателями эксплуатационных свойств.

Задачи исследования

1) в установленных диапазонах технологических режимов напыления спланировать и осуществить ряд экспериментов по исследованию адгезии покрытия, как на винтовых, так и на цилиндрических поверхностях шнека;

2) получить регрессионные уравнения зависимости адгезии покрытия на винтовой и цилиндрической поверхностях шнека от технологических режимов напыления;

3) произвести рациональный подбор технологических режимов плазменного напыления, удовлетворяющих нанесению композитного покрытия, как на винтовые, так и на цилиндрические поверхности шнека.

Для решения поставленных задач была применены методы, описанные в методологии экспериментальных исследований [6–8]. Спланирован и реализован многофакторный эксперимент по центральному композиционному рототабельному плану [9].

При проведении экспериментальных исследований не учитывался способ подготовки поверхности детали под нанесение покрытия, так как задача исследования состояла не в нахождении конкретного значения адгезии покрытия к основе, а в определении режимов напыления, обеспечивающих ее максимальную величину. Кроме того, характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения композитных покрытий со сжимающими остаточными напряжениями.

Материалы и методы

Исследования проводились на образцах, изготовленных по ГОСТ 103–2006 толщиной 20 мм и шириной 75 мм из стали 45, а также на цилиндрических образцах согласно ГОСТ 1497–84 (ISO 6892–84) диаметр которых составлял 50 мм ($D = 50$ мм), ввиду того, что допускается применение при испытании пропорциональных образцов других размеров.

Для нанесения исследуемых покрытий использовалась универсальная установка плазменного напыления УПУ-3Д с плазмотроном ПНК-50. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа был выбран аргон.

Поскольку главной задачей исследования состояла в определении режимов напыления, обеспечивающих максимальную величину адгезии покрытия с винтовой и цилиндрической основой, то характер нанесения покрытия имел свои особенности.

Для напыления винтовых и цилиндрических поверхностей образцов были назначены следующие режимы [10, 11]: I – сила тока дуги плазмотрона, 200–250 А; L – дистанция плазменного напыления, 50–150 мм; n – скорость вращения образца, 35–55 об/мин; s – подача, 4–6 мм/об; v – скорость перемещения плазмотрона, 3–7 мм/мин; Q – расход плазмообразующего газа (аргона) 0,8–1,8 м³/с; G – расход материала напыления, 0,3–0,5 кг/с.

В качестве материала напыления была назначена порошковая смесь, состоящая из 76,5%

порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40–64 мкм и 23,5% порошка карбида титана фракцией 63–80 мкм (73,6 мкм) [12]. Основным свойством покрытия из выбранного материала напыления является высокая стойкость к абразивному и эрозионному износу. В работах [13, 14] детально представлены результаты и выводы, характеризующие состав данной порошковой композиции.

После проведения напыления образцов проводились измерения адгезии, твердости и износостойкости полученных покрытий на стандартизированном и сертифицированном оборудовании (твердомер ПМТ-3, Макро Скретч Тестер Revetest Express, машина трения СМЦ-2).

Результаты исследований

Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения покрытий со сжимающими остаточными напряжениями и максимальной прочностью сцепления покрытия с основой. После проведения предварительных экспериментов, были составлены уровни варьирования факторов (таблица 1).

После проведения экспериментов и обработки полученных данных проводился корреляционный анализ информации, для винтовой поверхности (таблица 2), для цилиндрической поверхности (таблица 3).

Таблица 1.

Уровни варьирования факторов

Table 1.

Levels of variation of factors

Наименование Name	Кодовое обозначение фактора Factor code	Нижний уровень Lower level	Средний уровень Middle level	Верхний уровень Upper level
Сила ток дуги плазматрона I , А Plasmatron arc current strength I , A	X_1	200	225	250
Дистанция плазменного напыления L , мм Plasma spraying distance L , mm	X_2	50	100	150
Скорость вращения образца n , об/мин Sample rotation speed n , rpm	X_3	35	45	55
Подача s , мм/об Feed s , mm/rev	X_4	4	5	6
Скорость перемещения плазматрона v , мм/мин Plasmatron moving speed v , mm/min	X_5	3	5	7
Расход плазмообразующего газа, Q , л/с Plasma-forming gas consumption, Q , l/s	X_6	0,8	1,3	1,8
Расход напыляемого материала, G , г/с Consumption of sprayed material, G , g/s	X_7	0,3	0,4	0,5

Таблица 2.

Корреляционный анализ влияния режимов напыления на адгезию покрытия для винтовой поверхности

Table 2.

Correlation analysis of the effect of spraying modes on the adhesion of the coating for a screw surface

	Средние Mean	Ст. откл. St. Der.	y	X_1	X_2	X_5	X_6	X_7
y	308,500	14,449	1,000	0,633	-0,492	-0,281	0,316	-0,422
X_1	225,000	25,400	0,632	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X_2	100,000	50,800	-0,492	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
X_5	5,000	2,032	-0,281	0,000	0,000	1,000	-0,000	0,000
X_6	1,300	0,508	0,216	0,000	0,000	-0,000	1,000	-0,000
X_7	0,400	0,101	-0,422	0,000	0,000	0,000	-0,000	1,000

Таблица 3.

Корреляционный анализ влияния режимов напыления на адгезию покрытия для цилиндрической поверхности

Table 3.

Correlation analysis of the effect of spraying modes on coating adhesion for a cylindrical surface

	Средние Mean	Ст. откл. St. Der.	y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_6	X_7
y	316,500	14,907	1,000	0,608	-0,473	-0,304	-0,236	0,304	0,405
X_1	225,000	25,197	0,608	1,000	0,000	-0,000	0,000	0,000	0,754
X_2	100,000	50,395	-0,473	0,000	1,000	-0,000	0,000	0,000	-0,000
X_3	45,000	10,079	-0,304	-0,000	-0,000	1,000	0,000	0,000	-0,000
X_4	5,000	1,008	-0,236	0,000	0,000	0,000	1,000	-0,000	-0,000
X_6	1,300	0,504	0,204	0,000	0,000	0,000	-0,000	1,000	-0,000
X_7	0,400	0,101	0,405	0,754	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000	1,000

Из таблицы 2 видно, что из представленных факторов оказывают влияние на адгезию композитного покрытия лишь – X_1 , X_2 , X_7 .

Для цилиндрической же поверхности выявлена мультиколлинеарная связь между параметрами X_1 и X_7 , и, следовательно, учитывая аспекты теории эксперимента [7], согласно

таблицы 3 на адгезию покрытия оказывают влияние факторы – X_1 , X_2 , X_3 .

Затем проводился регрессионный анализ по влиянию режимов плазменного напыления на адгезию покрытий на винтовых (таблица 4) и цилиндрических поверхностях (таблица 5).

Таблица 4.

Регрессионный анализ влияния режимов напыления на адгезию покрытия на винтовой поверхности

Table 4.

Regression analysis of the effect of spraying modes on the adhesion of the coating on the screw surface

	σ парам.	σ ст. ош.	σ t	σ p	-95,00% дов. пр.	+95,00% дов. пр.	σ Beta(B)	σ ст. ош. В	-95,00% дов. пр.	+95,00% дов. пр.
Св. член Free term	306,375	0,236	1299,839	0,000	305,875	306,875	-	-	-	-
I	8,375	0,236	35,532	0,000	7,875	8,875	0,869	0,024	0,817	0,921
L	-3,958	0,236	-16,794	0,000	-4,458	-3,459	-0,411	0,024	-0,463	-0,359
m	-1,792	0,236	-7,601	0,000	-2,291	-1,292	-0,186	0,024	-0,238	-0,134
$I \times L$	1,375	0,236	5,834	0,000	0,875	1,875	0,143	0,024	0,091	0,194
$I \times m$	0,875	0,236	3,712	0,002	0,375	1,375	0,091	0,024	0,039	0,142
$L \times m$	-0,458	0,236	-1,945	0,069	-0,958	0,041	-0,047	0,024	-0,099	0,004
$I \times L \times m$	0,208	0,236	0,884	0,390	-0,291	0,708	0,021	0,024	-0,030	0,073

В результате регрессионного анализа данных были сформированы регрессионные уравнения в кодированных значениях

$$Y_1 = 297,12 + 27,79X_1 - 13,95X_2 - 4,21X_3 + 1,04X_1X_3 - 1,62X_2X_3 + 1,21X_1X_2X_3, \quad (1)$$

$$Y_2 = 306,37 + 8,37X_1 - 3,95X_2 - 1,79X_7 + 1,37X_1X_2 + 0,87X_1X_7 - 0,45X_2X_7 + 0,21X_1X_2X_7. \quad (2)$$

где Y_1 и Y_2 – адгезия покрытия, сформированного на цилиндрической и винтовой поверхностях.

Таблица 5.

Регрессионный анализ влияния режимов напыления на адгезию покрытия на цилиндрической поверхности

Table 5.

Regression analysis of the influence of spraying modes on coating adhesion on cylindrical surface

	σ парам.	σ ст. ош.	σ t	σ p	-95,00% дов. пр.	+95,00% дов. пр.	σ Beta(B)	σ ст. ош. В	-95,00% дов. пр.	+95,00% дов. пр.
Св. Член Free term	297,125	1,080	275,084	0,000	294,835	299,415	-	-	-	-
I	27,792	1,080	25,730	0,000	25,502	30,081	0,875	0,034	0,803	0,947
L	-13,958	1,080	-12,923	0,000	-16,248	-11,668	-0,439	0,034	-0,511	-0,367
n	-4,208	1,080	-3,896	0,001	-6,498	-1,918	-0,132	0,034	-0,204	-0,060
$I \times L$	1,042	1,080	0,964	0,349	-1,248	3,331	0,033	0,034	-0,039	0,105
$I \times n$	-0,042	1,080	-0,038	0,970	-2,331	2,248	-0,001	0,034	-0,073	0,071
$L \times n$	-1,625	1,080	-1,504	0,152	-3,915	0,665	-0,051	0,034	-0,123	0,021
$I \times L \times n$	1,208	1,080	1,119	0,280	-1,081	3,498	0,038	0,034	-0,034	0,110

Рассматривая уравнение (1), расчетный показатель критерия Фишера $F_p = 0,376$, что меньше табличного $F_{табл} = 3,2$, следовательно, уравнение адекватно. Расчетный показатель критерия Стьюдента оказался больше критического, следовательно, полученное уравнение значимо. Кроме того, видно, что исследуемая зависимость не линейная, при этом связь между исследуемыми параметрами (факторами) весьма сильная – множественный коэффициент корреляции 0,99.

Рассматривая уравнение (2), расчетный показатель критерия Фишера $F_p = 1,986$, что меньше табличного $F_{табл} = 3,2$, следовательно, уравнение адекватно. Из уравнения (2) видно,

что зависимость адгезии получаемого покрытия от режимов его напыления не линейная, при этом связь весьма сильная, поскольку множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,995. Критерий Стьюдента, при проверке уравнения на значимость, оказался больше критического $t_{крит} = 2,12$.

Следовательно, уравнения (1) и (2) согласно критериям Фишера и Стьюдента – адекватны и значимы.

В заводских условиях принято использовать натуральные значения режимов напыления и параметров покрытия, поэтому полученные регрессионные уравнения (1) и (2) запишем следующим образом

$$\sigma_1 = 93,86 + 1,11I - 0,28L - 0,42n, \quad (3)$$

$$\sigma_2 = 302,082 + 0,086I - 0,33L - 96,2m + 0,001IL + 0,34Im. \quad (4)$$

Полученные уравнения (3) и (4) можно графически визуализировать в виде функций желательности (рисунок 1).

Беря во внимание экономическую составляющую восстановления шнеков, а именно то, что необходимо использовать имеющийся ресурс (площади, станки, расходные материалы) весьма

рационального, то данный вид деталей обрабатывается за один проход, то есть происходит одновременное воздействие на цилиндрические и винтовые поверхности. Следовательно, возникает задача о назначении единых технологических режимов нанесения покрытий, как для винтовых, так и для цилиндрических поверхностей шнека.

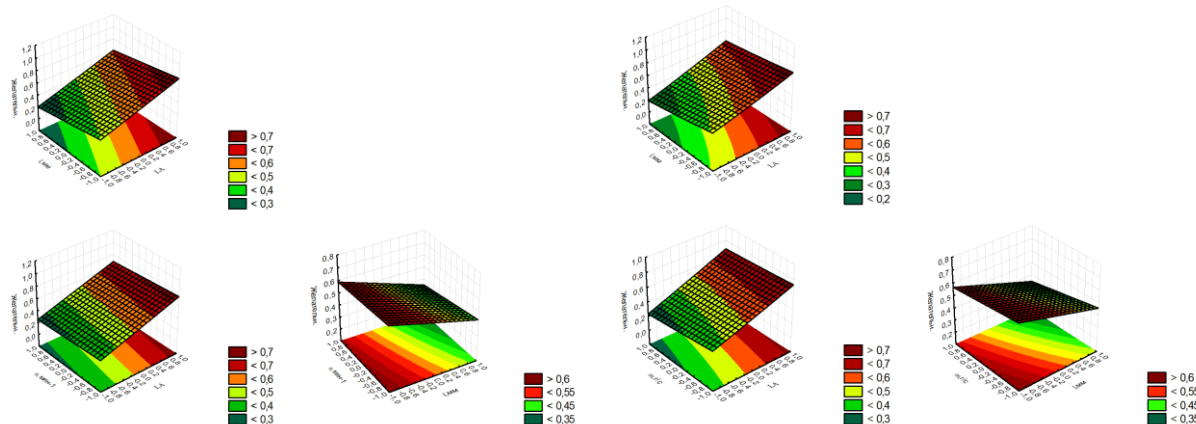


Рисунок 1. Визуализация функции желательности: а) для уравнения (3); б) для уравнения (4)
Figure 1. Visualization of the desirability function: a) for equation (3); b) for equation (4)

Используя программный комплекс «MathCad» [15] решаем поставленную задачу с уравнениями (3) и (4) (рисунок 2).

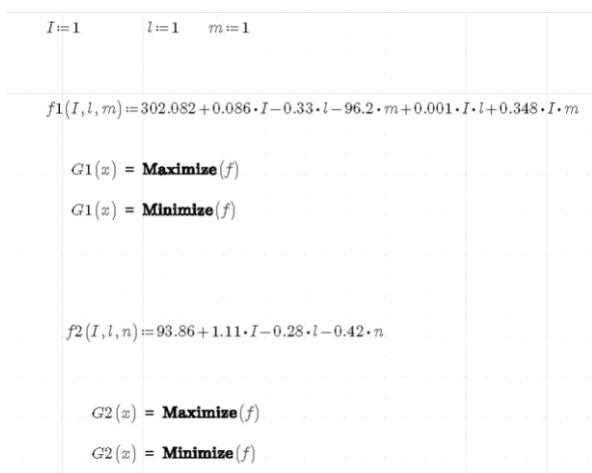


Рисунок 2. Постановка задачи в программном комплексе «MathCad»

Figure 2. Problem statement in the MathCad software package

Преобразование полученных данных производим в программе «Excel» [16].

В итоге получаем диапазоны режимов плазменного напыления для восстановления рабочих поверхностей шнека композитным покрытием [17]: сила тока дуги плазматрона I , 233–248 А; дистанция напыления L , 81–83 мм; расход напыляемого материала m , 0,4–0,5 г/с; скорость вращения детали n , 35–37 об/мин.

Обсуждение результатов

С целью подтверждения изысканий об адгезии покрытия были проведены исследование, используя метод скрэтч тестирования [18] с постоянной нагрузкой в 34 Н. Результаты представлены на рисунке 3а. У покрытия из порошкового материала [12, 17] разрушений и трещин не наблюдается.

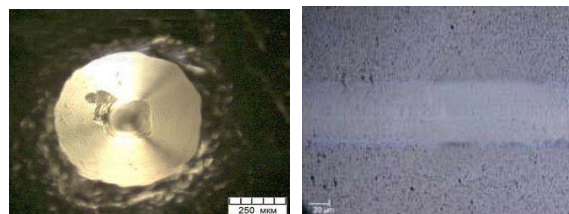


Рисунок 3. Результаты измерений: (а) царапина покрытия; (б) поверхность образца после измерения твердости

Figure 3. Measurement results: (a) coating scratch; (b) the surface of the sample after hardness measurement

Твердость композитного покрытия (HRC) измерялась на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 Н по методу Роквелла [19] (рисунок 3б). По результатам измерений твердость составила 64–66 HRC.

Определение износостойкости композитного покрытия проводилось на машине трения СМЦ-2 [20] согласно ГОСТ 23.208–79. Использовался абразивный материал – электрокорунд зернистостью 16-П по ГОСТ 3647–80 с относительным содержанием влаги не более 0,15%. Относительная износостойкость составила 3.39.

Заключение

По итогу проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) На основе корреляционного и регрессионного анализов был осуществлен подбор технологических режимов плазменного напыления, оказывающих непосредственное влияние на величину адгезии получаемого покрытия на винтовой и цилиндрической поверхностях шнека.

2) Проведены эксперименты, направленные на исследование адгезии покрытия, по итогу которых были получены регрессионные уравнения в кодированных и натуральных значениях. Получены графические интерпретации зависимости адгезии нанесенного покрытия от технологических режимов напыления в виде функций желательности, позволяющие оценить характер и степень влияния режимов на значения адгезии.

3) Произведен рациональный подбор технологических режимов плазменного напыления, удовлетворяющих нанесению композитного покрытия, как на винтовые, так и на цилиндрические поверхности шнека.

4) Исследована адгезия покрытия на экспериментальных образцах с применением метода

скрэтч тестирования, который показал низкую степень трещинообразования. Проведены измерения твердости и износостойкости покрытия, результат которых дал понимание о значительном превосходстве по указанным параметрам в сравнении с существующими современными аналогами.

Полученные результаты проведенного исследования позволяют рекомендовать технологические режимы с назначенным составом материала напыления для восстановления изношенных поверхностей шнеков транспортирующих конвейеров, которые весьма активно используются в авиа- и машиностроении.

Таким образом, проведя необходимые испытания и ряд экспериментов были сделаны выводы о том, что разработанные технологические режимы плазменного напыления с испытываемым порошковым составом [8, 10] необходимо рекомендовать на промышленные предприятия авиа- и машиностроения с целью рационализации процессов восстановления и ремонта изношенного оборудования, в частности транспортирующих агрегатов, как шнековый конвейер.

Литература

- 1 Бирюков В.П. Трение, износ и усталость. Москва: Российский университет транспорта, 2021. 227 с.
- 2 Зяблин В.Н., Безуглов А.М. К вопросу оптимизации формы винта шнекового погрузчика // Наука и инновации в современном мире: сборник научных статей. Москва: Издательство «Перо», 2021. С. 45–48.
- 3 Гвоздев А.А. Повышение ресурса узлов трения при ремонте и изготовлении сельскохозяйственной техники с использованием полимерных композиций. Иваново: Ивановский государственный университет, 2019. 256 с.
- 4 Бондарь В.С., Горячева И.Г., Матвиенко Ю.Г. и др. Ресурс материалов и конструкций. Москва: Московский Политех, 2019. 192 с.
- 5 Галиев И.Г., Мухаметшин А.А. Повышение эффективности эксплуатации тракторов в аграрном производстве. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Русайнс», 2021. 130 с.
- 6 Дунченко Н.И., Купцова С.В. Планирование и выполнение экспериментальных исследований. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2021. 138 с.
- 7 Большакова Л.В., Яковлева Н.А. Теория проверки статистических гипотез при математико-статистическом исследовании педагогических проблем // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2016. № 4 (72). С. 149–157.
- 8 Усманов Р.Р. Методика экспериментальных исследований в агрономии (с расчетами в программах Excel и Straz). Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. 81 с.
- 9 Петров М.А., Крутина Е.В. Основы теоретических и экспериментальных исследований. Москва: Московский Политех, 2023. 73 с.
- 10 Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Краснова М.Н., Пеньков Н.А. Моделирование кинематики плазменного напыления на сложнопроволочные поверхности // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 133–139.
- 11 Трифонов Г.И. Металломатричное композитное покрытие для восстановления и упрочнения поверхностей деталей плазменным напылением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. № 5(221). С. 225–230.
- 12 Пат. № 2797988, RU, C22C 32/00, C23C 4/10. Порошкообразный материал для плазменного напыления композитных покрытий / Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А. № 2022108222; Заявл. 28.03.2022; Опубл. 13.06.2023.
- 13 Трифонов Г.И., Пеньков Н.А., Дерканосова А.А., Краснова М.Н. Упрочнение покрытия плазменного напыления дисперсной дополнительной фазой карбида титана // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 3(93). С. 191–197. doi: 10.20914/2310-1202-2022-3-191-197
- 14 Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Егорова Г.Н., Белых А.Г. Исследование критериев качества двухфазных композитных покрытий на основе железа, формируемых методом плазменного напыления // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 4(90). С. 261–268. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-261-268

- 15 Qiryigitov B.A. Characterization different methods of approximation and interpolation and their implementation in Mathcad and Matlab // Экономика и социум. 2020. №. 12–1(79). Р. 234–236.
- 16 Жидков А.А., Барсукова А.Е., Караганова К.А. и др. Значение оптимизации при работе в Excel // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 12(104). С. 7.
- 17 Пат. № 2782903, RU, C23C 4/134, 4/10. Способ плазменного напыления покрытий на рабочие поверхности шнека / Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Пеньков Н.А. № 2022108220; Заявл. 28.03.2022; Опубл. 07.11.2022.
- 18 Шугуров А.Р., Акуликин А.А., Панин А.В., Сергеев В.П. и др. Исследование трещиностойкости покрытий TiAlN методом скретч-тестирования // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. №. 6. С. 66-74. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-treschinostoykosti-pokrytiy-tialn-metodom-skretch-testirovaniya>
- 19 Пучков П.В. К вопросу о методах определения твердости материалов // NovaInfo. Ru. 2018. Т. 1. № 90. С. 44–48.
- 20 Загидуллина Д.Р., Ибатуллин И.Д., Емельянов С.Г. Устройства для испытаний на трение и изнашивание // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №. 4-2. С. 285-290. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystva-dlya-ispytaniy-na-trenie-i-iznashivanie>

References

1. Biryukov V.P. Friction, wear and fatigue. Moscow: Russian University of Transport, 2021. 227 p. (in Russian).
2. Zyablin V.N., Bezuglov A.M. On the issue of optimizing the shape of a screw loader. Science and innovation in the modern world: collection of scientific articles. Moscow: Pero Publishing House, 2021. pp. 45–48. (in Russian).
3. Gvozdev A.A. Increasing the service life of friction units during the repair and manufacture of agricultural machinery using polymer compositions. Ivanovo, Ivanovo State University, 2019. 256 p. (in Russian).
4. Bondar V.S., Goryacheva I.G., Matvienko Yu.G. etc. Resource of materials and structures. Moscow, Moscow Polytechnic, 2019. 192 p. (in Russian).
5. Galiev I.G., Mukhametshin A.A. Increasing the efficiency of tractor operation in agricultural production. Moscow, Limited Liability Company "Ruseins", 2021. 130 p. (in Russian).
6. Dunchenko N.I., Kuptsova S.V. Design and execution of experimental studies. Moscow, OOO Sam Polygraphist, 2021. 138 p. (in Russian).
7. Bolshakova L.V., Yakovleva N.A. The theory of testing statistical hypotheses in mathematical and statistical research of pedagogical problems. Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2016. no. 4 (72). pp. 149-157. (in Russian).
8. Usmanov R.R. Methods of experimental research in agronomy (with calculations in Excel and Straz). Moscow, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after. K.A. Timiryazeva, 2022. 81 p. (in Russian).
9. Petrov M.A., Krutina E.V. Fundamentals of theoretical and experimental research. Moscow, Moscow Polytechnic, 2023. 73 p. (in Russian).
10. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Krasnova M.N., Penkov N.A. Modeling the kinematics of plasma spraying on complex-profile surfaces. Proceedings of GOSNITI. 2017. vol. 128. pp. 133-139. (in Russian).
11. Trifonov G.I. Metal matrix composite coating for restoration and strengthening of surfaces of parts by plasma spraying. Hardening technologies and coatings. 2023. vol. 19. no. 5(221). pp. 225–230. (in Russian).
12. Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu., Penkov N.A. Powdered material for plasma spraying of composite coatings. Patent RF, no. 2797988, 2023.
13. Trifonov G.I., Penkov N.A., Derkanosova A.A., Krasnova M.N. Strengthening of plasma spraying coating with a dispersed additional phase of titanium carbide. Proceedings of VSUET. 2022. vol. 84. no. 3(93). pp. 191–197. doi: 10.20914/2310-1202-2022-3-191-197 (in Russian).
14. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Egorova G.N., Belykh A.G. Study of quality criteria for two-phase iron-based composite coatings formed by plasma spraying. Proceedings of VGUET. 2021. vol. 83. no. 4(90). pp. 261–268. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-261-268 (in Russian).
15. Qiryigitov B.A. Characterization of different methods of approximation and interpolation and their implementation in Mathcad and Matlab. Economy and Society. 2020. no. 12–1(79). pp. 234–236. (in Russian).
16. Zhidkov A.A., Barsukova A.E., Karaganova K.A. and others. The importance of optimization when working in Excel. Modern scientific research and innovation. 2019. no. 12(104). pp. 7. (in Russian).
17. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Penkov N.A. Method of plasma spraying of coatings on the working surfaces of a screw. Patent RF, no. 2782903, 2022.
18. Shugurov A.R., Akulinkin A.A., Panin A.V., Sergeev V.P. et al. Study of the crack resistance of TiAlN coatings by scratch testing. Physical mesomechanics. 2015. vol. 18. no. 6. pp. 66-74. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-treschinostoykosti-pokrytiy-tialn-metodom-skretch-testirovaniya> (in Russian).
19. Puchkov P.V. On the issue of methods for determining the hardness of materials. NovaInfo. Ru. 2018. vol. 1. no. 90. pp. 44–48. (in Russian).
20. Zagidullina D.R., Ibatullin I.D., Emelyanov S.G. Devices for testing friction and wear. News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. vol. 18. no. 4-2. pp. 285-290. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystva-dlya-ispytaniy-na-trenie-i-iznashivanie>

Сведения об авторах

Сергей Ю. Жачкин д.т.н., профессор, кафедра эксплуатации транспортных и технологических машин, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, zhach@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>

Григорий И. Трифонов к.т.н., старший научный сотрудник, НИЦ (ППО и УА ВВС), Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54А, г. Воронеж, 394064, Россия, trifonov_gi@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>

Галина Н. Егорова к.п.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, egorovahp@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9907-9649>

Вклад авторов

Сергей Ю. Жачкин разработка концепции исследования, проведение экспериментальных исследований.

Григорий И. Трифонов обзор литературных источников по исследуемой проблеме, описание полученных результатов.

Галина Н. Егорова написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Sergey Yu. Zhachkin Dr. Sci. (Engin.), professor, operation of transport and technological machines department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 1, Michurina, Voronezh, 394087, Russia, zhach@list.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>

Grigory I. Trifonov Cand. Sci. (Engin.), research center, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54A Starye Bolshevikov str., Voronezh, 394064, Russia, trifonov_gi@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7739-5587>

Galina N. Egorova Cand. Sci. (Ped.), associate professor, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, egorovahp@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9907-9649>

Contribution

Sergey Yu. Zhachkin development of the research concept, conducting experimental studies

Grigory I. Trifonov review of the literature sources on the problem under study, a description of the results obtained

Galina N. Egorova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2024	После редакции 20/03/2024	Принята в печать 18/04/2024
Received 01/03/2024	Accepted in revised 20/03/2024	Accepted 18/04/2024