



МРНТИ 55.21.17

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-219-230>

Научная статья

Исследование режимов термосиловой обработки напыленных модифицированных слоев

С.Нураков¹, Б.О.Бостанов¹, Г.М.Тлепиева¹, С.Т.Нурсагатов², А.Б.Калиев*¹

¹Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Казахский агротехнический исследовательский университет им.С.Сейфуллина, Астана, Казахстан

(E-mail: *kaliev_ab@enu.kz)

Аннотация. Представлены результаты исследования свойств напыленных покрытий с последующей электротермосиловой обработкой, проведенного в рамках грантового проекта МНВО РК АР19680421. Рассмотрены особенности прохождения электрического тока через напыленное покрытие или предварительно сформованный порошковый слой. Исследованы свойства покрытий из стали 40Х13, полученных гиперзвуковой металлизацией с последующей электротермосиловой обработкой. Разработан метод получения покрытия, обладающего повышенными износостойкими характеристиками, который состоит из распыления на предварительно подготовленную обрабатываемую поверхность частиц двух металлических проволок, расплавленных при помощи электрической дуги, а также последующей электротермосиловой обработки полученного слоя. В качестве материала одной проволоки предложено выбирать сталь мартенситного класса, в качестве материала другой – никель-хромовый или железо-хромовый сплав с высоким удельным электросопротивлением, а диаметр проволоки из этого сплава определять в зависимости от диаметра стальной проволоки.

Ключевые слова: гиперзвуковая металлизация, электротермосиловая обработка, напыленные покрытия, износостойкость.

Поступила 17.08.2024. Доработана 21.08.2024. Одобрена 09.09.2024. Доступна онлайн 30.09.2024

^{1*}автор для корреспонденции

Введение

В процессе напыления покрытий зачастую наблюдается такое явление, как интенсивное взаимодействие их компонентов с рабочими газами, особенно, с кислородом. Это приводит к тому, что кислород растворяется в концентрациях, которые превышают его растворимость, характерную для равновесных условий кристаллизации. Данный растворенный в покрытии кислород способствует снижению в сравнении с напыляемым исходным материалом энергетического порога перехода в состояние структурной неустойчивости, являясь причиной уменьшения энергозатрат на перемещение контактирующих поверхностей относительно друг друга, что приводит к более высокой структурной адаптируемости. При этом, рассматривая систему «основа-покрытие», следует учесть, что повышенное электрическое сопротивление, а, следовательно, и выделение тепла, будет наблюдаться в некоторых характерных точках, а именно, в точках контакта напыленных частиц, покрытия с подложкой и др.

Методология

Рассмотрим процесс прохождения импульсов электрического тока через предварительно сформированный порошковый слой или напыленное покрытие. Анализ осциллограммы режимов (рисунок 1), записанной при скорости 2 мм/с, указывает на нестабильность протекания процесса в период между начальной фазой нагрева и началом активной усадки покрытий: мгновенные значения тока не одинаковы и изменяются по случайному закону.

В начальный момент прохождения тока в местах контакта токопроводящих частиц наблюдаются резкие температурные колебания, приводящие к разрушению старых и созданию новых точек контакта: происходит образование микродуговых разрядов, расплавляющих и частично испаряющих металлы и, таким образом, уничтожающих отдельные контакты и создающих новые за счет сваривания частиц. Этот период стабилизации процесса по продолжительности может достигать 3 с. По этой причине нестабильности протекания процессов следует более тщательно определять и обеспечивать постоянство заданных параметров режимов.

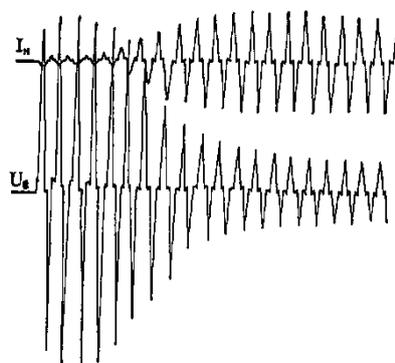


Рисунок 1. Осциллограмма прохождения электрического тока через напыленное покрытие

В дальнейшем наблюдается замедление усадки стального материала покрытия (при достижении температуры $\sim 720^{\circ}\text{C}$. По причине того, что во время пауз происходит охлаждение покрытия, нежелательно их наличие между импульсами тока вплоть до окончания нагрева, так как это приводит к увеличению продолжительности и повышению энергопотребления процесса спекания. Только лишь в случае возникновения опасности расплавления компонентов допускаются паузы между импульсами. После прекращения подачи электрического тока охлаждение материала происходит под давлением. За счет изменения скорости охлаждения возникает возможность проведения термообработки слоя.

При пропускании электрического тока через порошковый объем наблюдается стремительное повышение температуры в местах контактов частиц, а также в приконтактных областях. Происходит ряд процессов, таких как пластическое течение, уплотнение порошкового материала, зарастивание пор, сваривание контактов и др., приводящих к изменению физико-механических свойств материалов частиц и формированию высокоплотного слоя.

Уплотнение прессовок порошкового материала и пористых покрытий сопровождается взаимным перемещением частиц и их трением. Поэтому в контактах частиц поверхности трения смыкаются и размыкаются.

Трение шероховатых поверхностей частиц и их изнашивание за счет механического взаимодействия сопровождаются также разрушением за счет электроискровых разрядов, возникающих между отдельными частицами слоя. Электрические явления на поверхностях частиц идут более интенсивно и способствуют образованию высокоплотного материала слоя. Нагрев микроконтактов токопроводящих частиц в зоне контакта достигает, температур пластического течения и плавления, что способствует их спеканию.

При нагреве вследствие повышения активности протекания реакций между твердой и газовой фазами изменяется химический и структурный состав поверхностей частиц. Непосредственно в токопроводящих приконтактных зонах вероятно появление жидкой фазы, что ускоряет процессы химического взаимодействия. При спекании поверхности частиц окисляются (возникает и увеличивается пленка оксидов). Кислород, содержащийся в газовой среде пор (без доступа воздуха), восстанавливается.

В связи с этим контакты в процессе электроконтактного спекания разогреваются неодинаково и характеризуются различным теплоотводом в массу частиц. Кроме того, в одних контактах происходит выделение, в других - поглощение тепловой энергии. Неравномерность нагрева и электроэрозионного разрушения контактов способствуют образованию термотоков, теплоты Пельтье и электрической диффузии.

Переход электрической энергии в тепловую локализуется в микроконтактах токопроводящих частиц, через которые тепло отводится в тело частиц в моменты пауз (выключения тока). Процессы нагрева и охлаждения происходят с большой скоростью (изменение температуры до 1000°C в секунду), что приводит к структурной неравномерности материала.

Велико влияние и временных факторов нагрева и охлаждения на диффузионные процессы массопереноса, которые активированы благодаря совместному воздействию импульсного электромагнитного поля, а также нагреву и давлению.

В работах [1-3] отмечено значительное повышение коэффициентов диффузии химических элементов даже по сравнению с динамическим горячим прессованием, что подтверждает влияние специфических термодинамических условий импульсного электроконтактного спекания под давлением на ускорение физико-химических процессов гетерогенной и реактивной диффузии химических элементов.

Благодаря кратковременному пребыванию частиц слоя в зоне высоких температур они лишь частично успевают прореагировать между собой. Наибольший нагрев и даже некоторое оплавление частиц происходит лишь в их токопроводящих контактах, поэтому тугоплавкие неэлектропроводные частицы оказываются в малоизмененном виде. Это подтвердили микродюрметрические, металлографические и микро-рентгеноспектральные исследования.

За короткое время формирования материала твердые частицы практически не растворяются в связующем материале. Приповерхностные слои частиц обедняются легирующими элементами в результате диффузии последних в железоуглеродистый связующий металл. Протяженность диффузионной зоны мала, поэтому материал характеризуется резко выраженной неоднородной структурой.

По исследованию процесса и расчету мгновенных значений электро-сопротивления по осциллограммам I_n и U_n было установлено, что критические изменения мгновенных значений удельного электросопротивления на разных режимах электроконтактного спекания имеют аналогичный вид. На начальной стадии нагрева происходит замедленное снижение электросопротивления материала слоя при соответствующем увеличении силы тока. Быстрое снижение электросопротивления начинается по достижении материалом температуры 670...720°C (для материала на основе железа) при соответствующей скорости нарастания уплотнения и силы тока. На конечной стадии процесса спекания скорость его снижения замедляется на всех режимах. В конце нагрева удельное электросопротивление одного и того же материала, спекаемого на разных режимах, становится одинаковым. Электроконтактное спекание обычно заканчивается когда температура материала образца достигает максимального значения для установленного режима и наступает тепловое равновесие.

На образцы, изготовленные из стали Ст.3 и имеющие геометрические параметры: $\square 10$ мм, $H 10$ мм газотермическим напылением были нанесены покрытия Св-08 и 40X13. После этого методом ультразвуковой обработки покрытия были пропитаны углеродными наноструктурными материалами.

Электротермосиловая обработка образцов напыленных покрытий проводилась на следующих режимах: $I_n = 4,0$ кА; $P = 15$ МПа; $t = 5$ сек; $j = 5,0$ кА/см².

В процессе корректировки режимов термосиловой обработки напыленных модифицированных слоев была получена следующая циклограмма работы установки (рисунок 2).

При $t_{ц1} = t_{ц2}$ и $t_{н1} = t_{н2}$: $F_2 = F_1/2$ и $I_{н2} = I_1/2$.

За счет смещения цикла времени нагрева $t_{н2}$ к началу общего цикла без увеличения продолжительности общего цикла было увеличено время посттермического воздействия, что дало возможность снизить нагрузку с охлаждаемого слоя. А это, в свою очередь, привело к уменьшению внутренних напряжений.

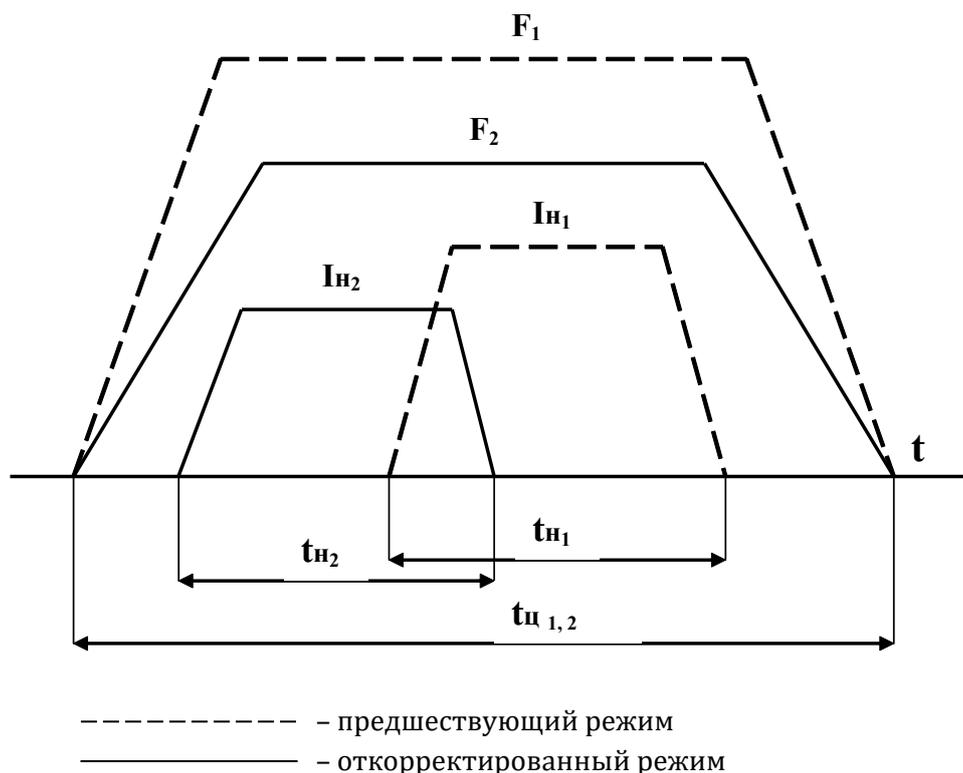


Рисунок 2. Циклограмма работы установки электротермосиловой обработки

Как было отмечено ранее, ускорение процесса спекания и соответственное повышение его производительности происходит за счет интенсификации электроконтактной обработки полученных напыленных покрытий, а также порошковых слоев [3, 4]. При этом, начальное электрическое сопротивление является основным определяющим фактором стабильности выделения тепла в порошковом слое. Создание в слое стабильного по сечению начального сопротивления при возможных наименьших значениях контактного давления (до 40-50 МПа) способствует получению покрытий высокого качества. Удельное электросопротивление слоя не ниже $(4-6) \cdot 10^{-5}$ Ом·м позволяет достичь высокой адгезионной прочности и низкой пористости (~3%). Изменение продолжительности электроконтактного взаимодействия также может служить причиной повышения электросопротивления.

Было предложено использовать для повышения электросопротивления напыленного слоя технологию нанесения псевдосплавных покрытий [5], которая хорошо зарекомендовала себя при восстановлении-упрочнении деталей узлов трения скольжения [6-8]. Технология заключается в том, что в распылительную головку металлизатора подают две проволоки, выполненные из разнородных металлов (например, сталь и бронза). После расплавления проволок в дуге и последующего распыления формируется покрытие, содержащее равномерно распределенные частицы этих разнородных металлов, причем их объемное соотношение пропорционально соотношению их диаметров.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны проволока из стали 40X13 и проволоки из сплавов с высоким удельным электросопротивлением: нихром (X20H80, $\rho=1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), фехраль (X23Ю5Т, $\rho=1,35 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) и хромаль (X27Ю5А, $\rho=1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м). Диаметр проволок с высоким электросопротивлением составлял от 1,1 до 2,2 мм (таблица 1). Всего было изготовлено методом ГМ 48 образцов покрытий, у которых оценивалась микротвердость, наличие поверхностных трещин и износостойкость в среде незакрепленного абразива (порошок электрокорунда с размером частиц 0,8-1,0 мм).

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований приведены в таблице 1. Жирным шрифтом отмечены данные, полученные у образцов с наиболее высокой микротвердостью и износостойкостью.

Таблица 1. Свойства покрытий из стали 40X13, полученных гиперзвуковой металлизацией с последующей электротермосиловой обработкой

Материал второй проволоки и его уд. электросопротивление ρ , Ом·м	Диаметр проволоки из стали 40X13 D, мм	Диаметр второй проволоки d_p , мм	Свойства покрытия		
			Наличие трещин	Микротвердость, МПа	Относит. износостойкость при сухом трении в абразиве*
1	2	3	4	5	6
Нихром $1,1 \cdot 10^{-6}$	1,6	1,1	-	7900	1,05
		1,6	-	8200	1,10
		1,6	-	8800	1,30
		1,8	+	8600	1,15
	1,8	1,1	-	7800	1,05
		1,3	-	8000	1,10
		1,8	-	8400	1,15
		1,8	-	8800	1,30
	2,0	1,1	-	7800	1,00
		1,3	-	8100	1,10
		1,6	-	8100	1,15
		1,8	+	8200	1,15
	2,2	1,3	-	8300	1,20
		1,6	-	8400	1,20
		1,8	-	8600	1,20
		2,2	-	8900	1,30
Фехраль $1,3 \cdot 10^{-6}$	1,6	1,1	-	8400	1,15
		1,3	-	8700	1,35
		1,6	-	8800	1,35

	1,8	1,8	-	8500	1,20
		1,1	-	7900	1,05
		1,3	-	8100	1,15
		1,6	-	8300	1,20
		1,8	-	8900	1,40
	2,0	1,1	-	7800	1,00
		1,3	-	8000	1,10
			1,6	-	8200
1,8			+	8200	1,15
2,2		1,3	-	8100	1,10
		1,6	-	8400	1,20
		1,8	-	9000	1,40
		2,2	+	8500	1,20
Хромаль $1,5 \cdot 10^{-6}$	1,6	1,1	-	8800	1,35
		1,3	-	8400	1,20
		1,6	-	8000	1,10
		1,8	+	8000	1,10
	1,8	1,3	-	9000	1,40
		1,6	-	8400	1,20
		1,8	-	8400	1,20
	2,0	1,1	-	8000	1,00
1	2	3	4	5	6
Хромаль $1,5 \cdot 10^{-6}$	2,0	1,3	-	8500	1,15
		1,6	-	9000	1,35
		1,8	-	8500	1,15
	2,2	1,3	-	8400	1,20
		1,6	-	8500	1,20
		1,8	-	9100	1,35
		2,2	+	8500	1,20

*В сравнении с износостойкостью покрытия из стали 40X13 после электротермосиловой обработки ($I = 1$)

Выполнив аппроксимацию и соответствующую математическую обработку данных, отмеченных жирным шрифтом, было установлено, что для получения высоких значений свойств покрытий диаметр проволоки из материала с высоким удельным

электросопротивлением необходимо выбирать в зависимости от диаметра стальной проволоки, используя следующее выражение:

$$d = \frac{k \cdot \ln D}{\rho \cdot D^{0,5}}, \quad (1)$$

где D – диаметр стальной проволоки, мм; d – диаметр проволоки из сплава с высоким удельным электросопротивлением, мм; ρ – удельное электросопротивление сплава, Ом·м; k – коэффициент, численно равный $4,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·м·мм^{1,5}.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований был предложен способ получения износостойкого покрытия, включающий формирование струи из распыленных частиц расплавленных в электрической дуге двух металлических проволок, их осаждение в виде слоя на предварительно подготовленную поверхность детали и последующую электротермосиловую обработку слоя, причем в качестве материала одной проволоки выбирают сталь мартенситного класса, в качестве материала другой – никель-хромовый или железо-хромовый сплав с высоким удельным электросопротивлением, а диаметр проволоки из этого сплава выбирают в зависимости от диаметра стальной проволоки исходя из соотношения (1).

Заключение

Показано, что интенсификация температурно-силовых параметров при электротермосиловой обработке напыленных покрытий ускоряет их уплотнение, спекание и, следовательно, увеличивает производительность процесса. Предложено для получения покрытий высокого качества создавать в слое стабильное по сечению начальное электросопротивление при возможно меньших значениях контактного давления (40-50 МПа), для чего использовать технологию нанесения псевдосплавных покрытий.

Предложен способ получения износостойкого покрытия, включающий формирование струи из распыленных частиц расплавленных в электрической дуге двух металлических проволок, их осаждение в виде слоя на предварительно подготовленную поверхность детали и последующую электротермосиловую обработку слоя, причем в качестве материала одной проволоки выбирают сталь мартенситного класса, в качестве материала другой – никель-хромовый или железо-хромовый сплав с высоким удельным электросопротивлением, а диаметр проволоки из этого сплава выбирают в зависимости от диаметра стальной проволоки.

Разработанным способом получены покрытия на основе стали мартенситного класса 40Х13 с микротвердостью 8800-9000 МПа и износостойкостью, в 1,4 раза превышающей износостойкость покрытий из той же стали, полученных ранее известными методами.

Благодарности. Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP19680421).

Вклад авторов

С.Нураков – концепция, методология, экспериментальная часть.

Б.О.Бостанов – интерпретация, экспериментальная часть.

Г.М.Тлепиева – анализ литературы, экспериментальная часть

С.Т.Нурсағатов – интерпретация, написание, редактирование

А.Б.Калиев – интерпретация, методология, написание

Список литературы

Л.А.Лопата, Ю.В.Волков, Т.В.Ворона, А.Е.Соловых. Электродноконтактное припекание дискретных покрытий // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 14-й международной научно-технической конференции. – Киев, 2014. – С.63-66.

Ярошевич В.К., Генкин Я.С., Верещагин В.А. Электродноконтактное упрочнение. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 256 с.

Ярошевич В.К. Электродноконтактное припекание порошковых покрытий и обеспечение стабильности их свойств // Вестник БНТУ, сер. Металлургия. Металлообработка. Машиностроение. – 2009. – № 1. – С.18-21.

М.И.Черновол, Т.В.Ворона, О.А.Микосянчик, Л.А.Лопата. Структурно-фазовые превращения в газотермических стальных покрытиях в процессе их напыления и последующей электродноконтактной обработки // Научно-технічний журнал «Проблема тертя та зношування». – 2015. – №2(67) – С.99-109.

Белоцерковский М.А. Технологические приемы гиперзвуковой металлизации при распылении проволок из разнородных металлов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – №1. – С.79-84.

Кукареко В.А., Белоцерковский М.А. Григорчик А.Н., Астрашаб Е.В., Сосновский А.В. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т.15. №8. – С.355-359.

Дудан А.В., Ялович А.П., Белоцерковский М.А. Инновационные технологии восстановления штоков гидроцилиндров. – Новополюцк: ПГУ. – 2020. – 232 с.

Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Коробов Ю.С., Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н. Структурно-фазовый состав газотермического покрытия из Fe-Cr-Ni-Al-псевдосплава, подвергнутого отжигу // Литье и металлургия. – 2021. – №4. – С.112 – 115.

С.Нұрақов¹, Б.О.Бостанов¹, Г.М.Тілепиева¹, С.Т.Нұрсағатов², Ә.Б.Қалиев*¹

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

Бүріккіш модификацияланған қабаттардың термиялық қуатты өңдеу режимдерін зерттеу

Аңдатпа. ҚР ҒЖБМ АР19680421 гранттық жобасы шеңберінде жүргізілген электрлік термиялық өңдеуден кейін тозаңдатылған жабындардың қасиеттерін зерттеу нәтижелері

берілген. Электр тогының бүріккіш жабын немесе алдын ала қалыптасқан ұнтақ қабаты арқылы өту ерекшеліктері қарастырылады. Гипердыбыстық металдандыру арқылы алынған, кейіннен электрлік температуралық күштік өңдеу өткізілген 40X13 маркалы болаттан жасалған жабындардың қасиеттері зерттелді. Тозуға төзімді жабынды алу әдісі ұсынылған, оның ішінде электр доғасында балқытылған екі металл сымның тозаңдатылған бөлшектерінен ағын қалыптастыру, оларды алдын-ала дайындалған бөлшек бетіне қабат ретінде тұндыру және қабатты кейіннен электрлік температуралық күштік өңдеу. Бір сымның материалы ретінде мартенсит класындағы болатты, екіншісінің материалы ретінде жоғары меншікті электр кедергісі бар никель-хром немесе темір-хром қорытпасын таңдау ұсынылады, ал осы қорытпадан жасалған сымның диаметрі болат сымның диаметріне байланысты анықталады.

Түйін сөздер: гипердыбыстық металдандыру, электртермиялық күштік өңдеу, тозаңдатылған жабындар, тозуға төзімділік.

S. Nurakov¹, B.O. Bostanov¹, G.M. Tlepiyeva¹, S.T. Nursagatov², A.B. Kaliyev*¹

¹L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

Investigation of the modes of thermal power treatment of sprayed modified layers

Abstract. The paper presents the findings of a study investigating the properties of sprayed coatings with subsequent electrothermally treated within the context of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan grant project AR19680421. This study considers the peculiarities of electric current flow through the sprayed coating or pre-formed powder layer. The properties of 40X13 steel coatings obtained by hypersonic metallization followed by electrothermosilic treatment are investigated. A method for obtaining a wear-resistant coating is proposed, including the formation of a jet of sprayed particles of two metal wires melted in an electric arc, their deposition as a layer on a pre-prepared surface of the part and subsequent electrothermosilic treatment of the layer. It is proposed to choose martensitic steel as the material of one wire, nickel–chromium or iron-chromium alloy with high electrical resistivity as the material of the other, and the diameter of the wire made of this alloy should be determined depending on the diameter of the steel wire.

Keywords: hypersonic metallization, electrothermosilic force treatment, sprayed coatings, wear resistance.

References

1. L.A.Lopata, YU.V.Volkov, T.V.Vorona, A.E.Solovyh. Elektrokontaktное pripekanie diskretnyh pokrytij // Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij: materialy 14-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. – Kiev, 2014. – S.63-66.
2. YArOshevich V.K., Genkin YA.S., Vereshchagin V.A. Elektrokontaktное uprochnenie. – Mn.: Nauka i tekhnika, 1982. – 256 s.
3. YArOshevich V. K. Elektrokontaktное pripekanie poroshkovyh pokrytij i obespechenie stabil'nosti ih svoystv // Vestnik BNTU, ser. Metallurgiya. Metalloobrabotka. Mashinostroenie. – 2009. – № 1. – S.18-21.

4. M.I.Chernovol, T.V.Vorona, O.A.Mikosyanchik, L.A.Lopata. Strukturno-fazovye prevrashcheniya v gazotermicheskikh stal'nyh pokrytyyah v processe ih napyleniya i posleduyushchej elektrokontaktnoj obrabotki // Naukovo-tekhnichnij zhurnal «Problema tertya ta znoshuvannya». – 2015. – №2(67) – S.99-109.

5. Belocerkovskij M.A. Tekhnologicheskie priemy giperzvukovoj metallizacii pri raspylenii provolok iz raznorodnyh metallov // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. – 2019. – №1. – S.79-84.

6. Kukareko V.A., Belocerkovskij M.A. Grigorichik A.N., Astrashab E.V., Sosnovskij A.V. Strukturno-fazovoe sostoyanie i tribotekhnicheskie svoystva psevdosplavov, napylenykh iz vysokohromistykh stalej i cvetnykh metallov // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2019. – T.15. №8. – S.355-359.

7. Dudan A.V., Yalovik A.P., Belocerkovskij M.A. Innovacionnye tekhnologii vosstanovleniya shtokov gidrocilindrov. – Novopolock: PGU. – 2020. – 232 s.

8. Belocerkovskij M.A., Kukareko V.A., Korobov YU.S., Astrashab E.V., Grigorichik A.N. Strukturno-fazovyy sostav gazotermicheskogo pokrytiya iz Fe-Cr-Ni-Al-psevdosplava, podvergnutogo otzhigu // Lit'e i metallurgiya. – 2021. – №4. – S.112 – 115.

Сведения об авторах

С.Нураков – доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, ул.К.И.Сатпаева, 2, Астана, Казахстан

Б.О.Бостанов – кандидат технических наук, Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, ул.К.И.Сатпаева, 2, Астана, Казахстан

Г.М.Тлепиева – кандидат технических наук, Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, ул.К.И.Сатпаева, 2, Астана, Казахстан

С.Т.Нурсағатов – кандидат технических наук, Казахский агротехнический исследовательский университет им.С.Сейфуллина, пр.Женис, 62, Астана, Казахстан

А.Б.Қалиев – кандидат технических наук, Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, ул.К.И.Сатпаева, 2, Астана, Казахстан

С.Нұрақов – техника ғылымдарының докторы, профессор, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қ.И.Сәтбаев көшесі, 2, Астана қ., Қазақстан

Б.О.Бостанов – техника ғылымдарының кандидаты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қ.И.Сәтбаев көшесі, 2, Астана қ., Қазақстан

Г.М.Тлепиева – техника ғылымдарының кандидаты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қ.И.Сәтбаев көшесі, 2, Астана қ., Қазақстан

С.Т.Нұрсағатов – техника ғылымдарының кандидаты, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан

Ә.Б.Қалиев – техника ғылымдарының кандидаты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қ.И.Сәтбаев көшесі, 2, Астана қ., Қазақстан

S.Nurakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, K.I. Satpayev St., 2, Astana, Kazakhstan

B.O.Bostanov – Candidate of Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, K.I. Satpayev St., 2, Astana, Kazakhstan

G.M.Tlepiyeva – Candidate of Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, K.I. Satpayev St., 2, Astana, Kazakhstan

S.T.Nursagatov – Candidate of Technical Sciences, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Zhenis Ave., 62, Astana, Kazakhstan

A.B.Kaliyev – Candidate of Technical Sciences, L.N.Gumilyov Eurasian National University, K.I. Satpayev St., 2, Astana, Kazakhstan



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).