DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-34-47

УДК 621.793

UDC 621.793

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

УПРОЧНЕНИЕ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН ПЛАЗМЕННЫМ НАНЕСЕНИЕМ И УПРОЧНЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Плахотин Александр Александрович,
младший научный сотрудник военного учебно-научного центра военно-воздушных сил, «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина».

✉[1] **Кадырметов Анвар Минирович,**
д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Попов Дмитрий Анатольевич,
к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: qaz.7@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема повышения качества при изготовлении и восстановлении рабочих поверхностей деталей пар трения на примере цилиндров автомобильных ДВС и режущих элементов рабочих органов лесных машин, обеспечивающих их самозатачиваемость в процессе эксплуатации, с помощью усовершенствованного метода плазменного нанесения и упрочнения покрытий.

STRENGTHENING WEAR PARTSSURFACES OF FORESTRY MACHINERY PARTS BY PLASMA APPLICATION AND HARDENING OF COATINGS OF VARIABLE COMPOSITION

Plakhotin Alexander Alexandrovich,
Junior Researcher at the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin".

✉[1] **Kadyrmetov Anvar Minirovich,**
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Popov Dmitry Anatolyevich,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: qaz.7@mail.ru

Annotation. The problem of improving quality in the manufacture and restoration of working surfaces of friction pair parts is considered using the example of cylinders of automobile internal combustion engines and cutting elements of working parts of forestry machines, ensuring their self-sharpening during operation, using an improved method of plasma deposition and hardening of coatings.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ, УПРОЧНЕНИЕ, ПОКРЫТИЯ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА, САМОЗАТАЧИВАНИЕ ЛЕЗВИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ.

Keywords: PLASMA COATING, HARDENING, COATINGS OF VARIABLE COMPOSITION, SELF-SHARPENING OF WORKING ENGINE BLADES.

[1] *Автор для ведения переписки*

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Одной из основных причин потери работоспособности машин является изнашивание деталей, вследствие которого процент отказов в процессе эксплуатации достигает 80 процентов и более [1-6]. Это обусловливает актуальность задачи повышения качества и износостойкости рабочих поверхностей деталей пар трения и режущих элементов рабочих органов машин, решение которой позволяет обеспечить увеличение ресурса машин. При этом использование подхода нанесения покрытий с переменным составом как функции координат поверхности дополнительно позволяет, во-первых, обеспечить равномерность изнашивания поверхностей трения при пространственно неравномерных изнашивающих воздействиях и, во-вторых, сэкономить на дорогостоящих высокоизносостойких составляющих покрытия [7].

К одному из эффективных подходов создания поверхностных слоев относится нанесение покрытий с помощью прогрессивных плазменных методов нанесения покрытий [8]. Имеющиеся недостатки данных методов, обусловленные перегревом, рекристаллизацией материала детали и ее короблением для плазменной наплавки, и недостаточными прочностными характеристиками покрытия для плазменного напыления, устраняются путем совершенствования самого процесса плазменного нанесения и упрочнением полученного покрытия (рис. 1) [9]. Одним из эффективных способов упрочнения покрытий является использование двухдуговых плазмотронов в режиме модуляции электрической мощности косвенной и прямой дуг (рис. 2), что позволяет повысить адгезионную и когезионную прочность покрытия, твердость и износостойкость. Однако данный способ не обеспечивает равномерности износа покрытия на всех участках рабочих поверхностей деталей при неравномерных изнашивающих нагрузках, и для данного способа не известны зависимости критериев комбинированного двухдугового процесса от его факторов как для трущихся поверхностей пар трения, так и для режущих поверхностей лезвий рабочих органов лесных машин.

Типичным примером первой группы поверхностей являются рабочие поверхности цилиндров ДВС, второй группы – лемехи плугов. Анализ современной информации подтвердил актуальность решения данной проблемы и позволил выдвинуть гипотезы по устранению неравномерности изнашивания покрытия использованием покрытий переменного состава путем модуляции мощности выносной дуги плазмотрона и регулирования расхода твердой составляющей порошка в процессе нанесения покрытия (рис. 3) [7,10-13].

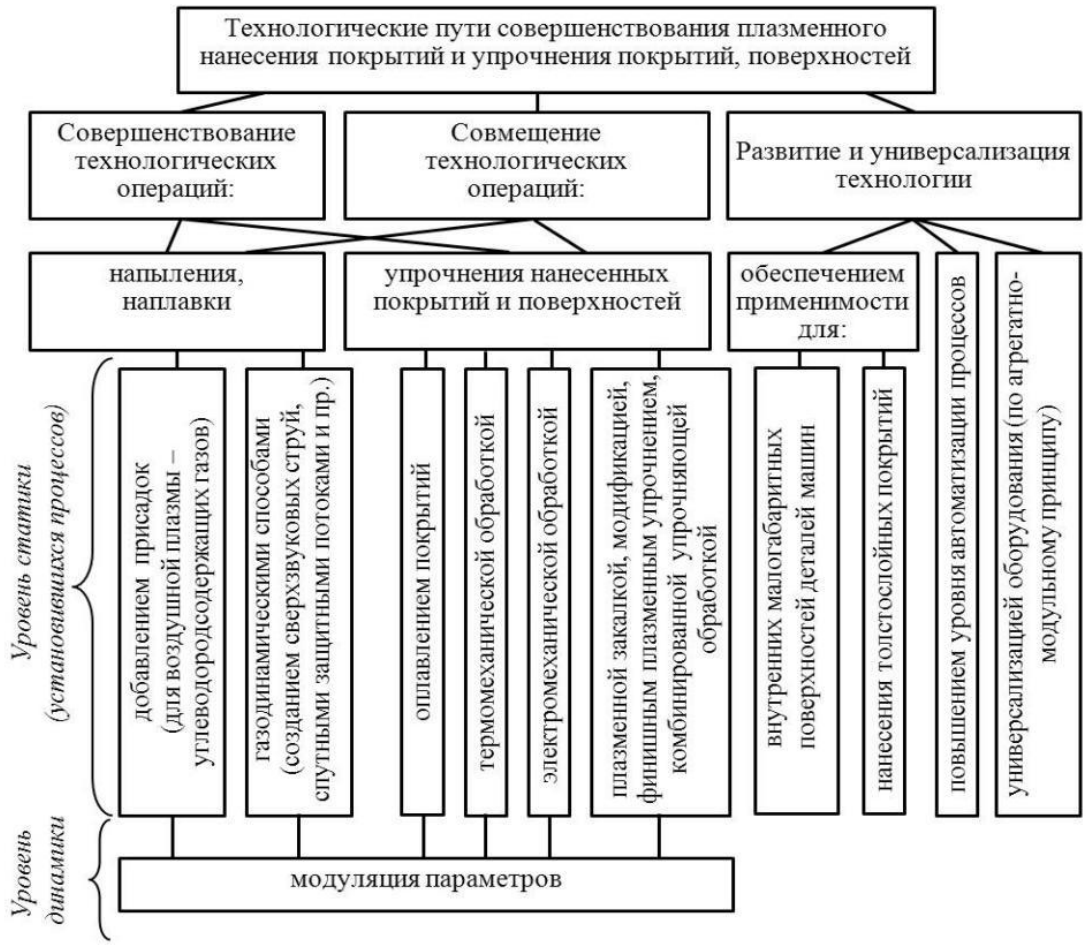
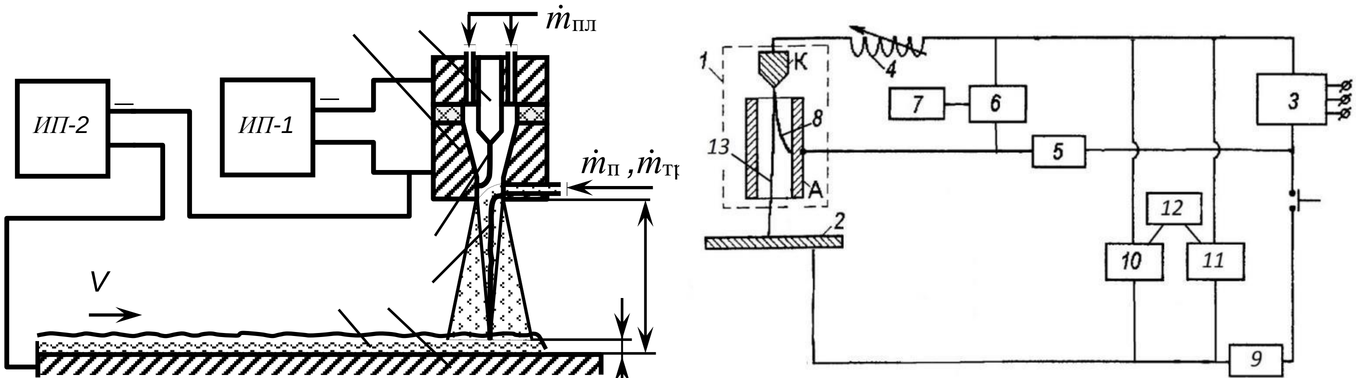


Рисунок 1 – Пути повышения эффективности плазменного нанесения и упрочнения покрытий



1 – катод; 2 – анод; 3 – косвенная (пилотная) дуга; 4 – прямая (вынесенная) дуга; 5 – подложка; 6 – покрытие; *ИП-1, ИП-2* – источник питания косвенной и прямой дуги соответственно; *V* – скорость перемещения (подача) плазмотрона; $\dot{m}_{пл}$, $\dot{m}_{п}$, $\dot{m}_{тр}$ – расход плазмообразующего газа, материала покрытия и транспортирующего газа соответственно; *h* – толщина покрытия; *L* – дистанция нанесения и/или упрочнения покрытия

1 – плазматрон; 2 – подложка; 3 – источник питания; 4 – катушка индуктивности; 5 – балластное сопротивление; 6 – модулятор; 7 – блок управления; 8 – косвенная дуга; 9 – балластное сопротивление; 10, 11 – модуляторы; 12 – блок управления; 13 – прямая дуга

Рисунок 2 – Схема источника питания и процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытия с обработкой поверхности выносной (прямой) дугой

Типичным примером первой группы поверхностей являются рабочие поверхности цилиндров ДВС, второй группы – лемехи плугов. Анализ современной информации подтвердил актуальность решения данной проблемы и позволил выдвинуть гипотезы по устранению неравномерности изнашивания покрытия использованием покрытий переменного состава путем модуляции мощности выносной дуги плазмотрона и регулирования расхода твердой составляющей порошка в процессе нанесения покрытия (рис. 3) [7,10-13].

Рисунок 3 - Прогрессивные газотермические технологии нанесения покрытий

На основе этого была определена научная проблема плазменного нанесения и упрочнения покрытий переменного состава с оптимальным распределением в них высокотвердых составляющих, обеспечивающих равномерность изнашивания всех участков поверхности трения при нерааномерном изнашивающем воздействии и самозатачиваемость лезвий рабочих органов машин в условиях управления процессом с помощью модуляции мощности плазмоторона.

2 Материалы и методы

На рис. 4 представлены схемы процессов плазменного формирования равномерно-изнашиваемого покрытия на поверхности гильзы цилиндра ДВС с помощью регулирования расхода упрочняющей доли порошка по профилю цилиндра и скорости движения пятна напыления.

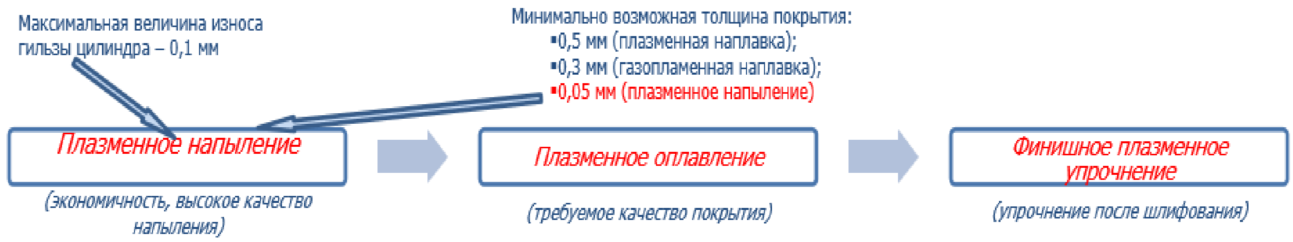


Рисунок 4 – Схема процессов формирования равномерноизнашиваемого покрытия на поверхности гильзы цилиндров ДВС

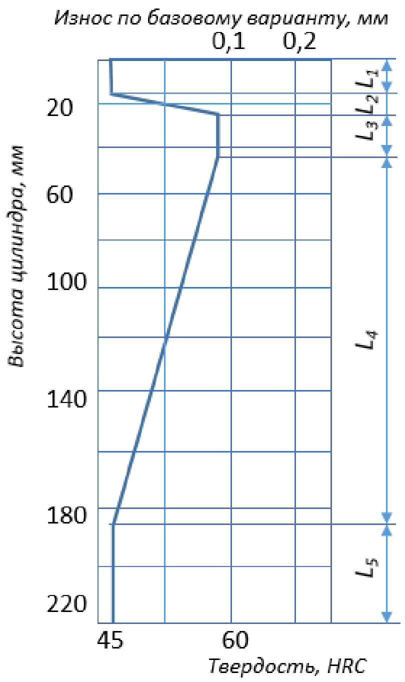


Рисунок 5 – Желаемое изменение твердости в покрытии, обеспечивающее равномерный износ рабочей поверхности цилиндра

Математическая модель распределения переменного состава покрытия по поверхности, а именно, распределения упрочняющей доли порошка $\varphi_{уп}$ по длине цилиндра x, обеспечивающее равномерный износ покрытия, представляется функцией (рис. 5):

$$\varphi уп = 0 \text{ при } x \le L1 \text{ и } x \ge i=14Li. \quad (1)$$

$$\varphi уп = 50\ \% \text{ при } L1+L2<x \le L1+L2+L3. \quad (2)$$

$$\varphi_{уп} = -\frac{50 \cdot \sum_{i=1}^{4} L_i}{L_4} + \frac{50}{L_4} \cdot x \ \ при \ \ L_1 + L_2 + L_3 < x \le$$
$$\le$$

Зависимость изменения скорости перемещения плазмотрона $v_{нап}$ по длине цилиндра x, обеспечивающая линейность профиля покрытия для случая напыления на имеющийся профиль износа (только с абразивной подготовкой поверхности под напыление без предварительного шлифования), имеет вид:

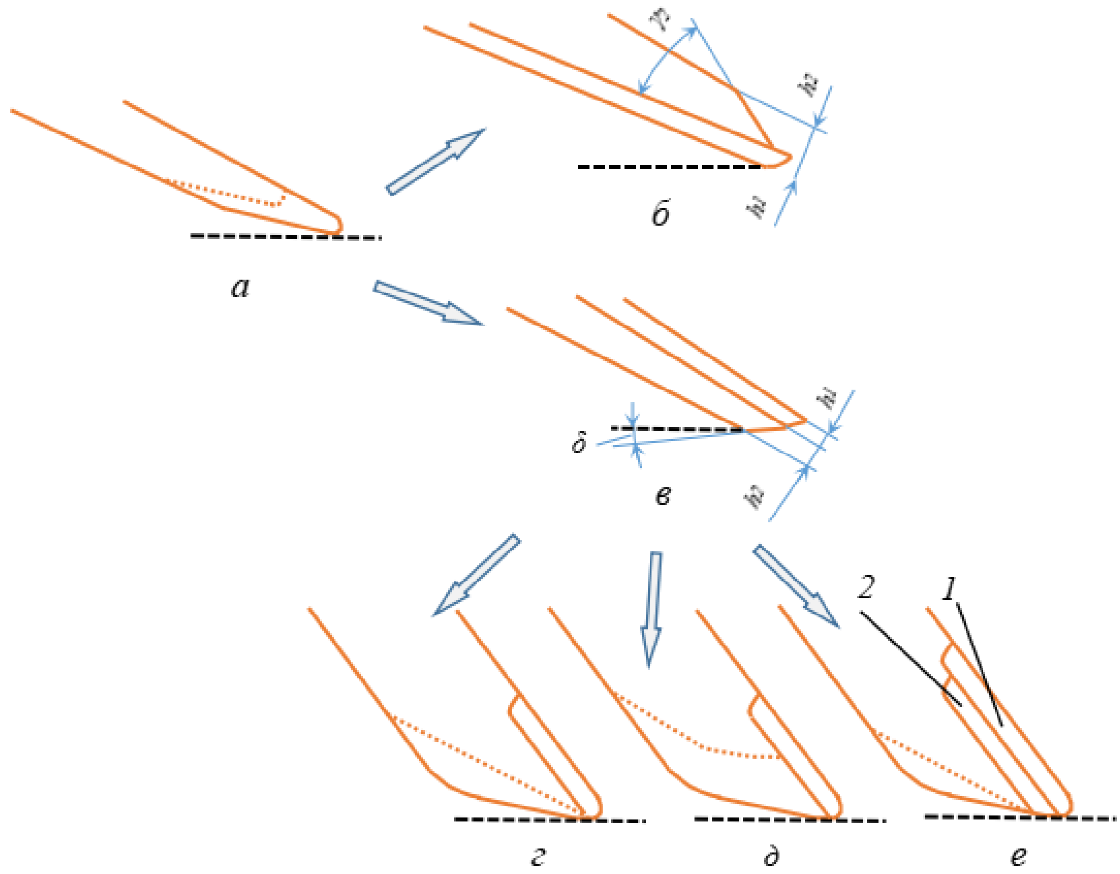
$$\upsilon пят = Gnophпокр(x) \cdot b \cdot \rho покр\ , \quad (4)$$

где $G_{пор}$ – расход порошка, кг/с; ρпокр – плотность покрытия, кг/м3;

$h_{покр}(x)$, b – толщина и ширина слоя покрытия соответственно, м.

На рис. 6 представлена схема процессов формирования структуры лезвия рабочих органов с помощью самозатачивающегося покрытия, на рис. 7 – схемы затачивания и изнашивания режущих кромок ножей рабочих органов. В частности, для схемы самозатачивания двухслойных покрытий первого рода твердый слой покрытия находится на нижней поверхности лемеха, а для повышения его прочности под ним наносят менее твердый слой (на рис. 7 не показан), а для покрытий второго рода более твердый слой наносят не переднюю поверхность лемеха под менее твердый слой.

Рисунок 6 – Схема процессов формирования многослойной структуры самозатачивающегося покрытия лезвия рабочих органов



а – базовый вариант без покрытия; *б, в* – лезвие с твердым покрытием 1-го и 2-го рода соответственно; *г, д* – наплавка передней плоскости твердым сплавом при высокой и невысокой износостойкости основного металла лезвия соответственно; *е* – наплавка в два слоя различной твердости (слой *2* более износостоек, чем слой *1*); точечная линия показывает поверхность износа

Рисунок 7 – Схемы затачивания и изнашивания режущих кромок ножей рабочих органов

Для решения технологической проблемы выбора режимов была разработана физическая модель объекта исследования [14-17]. Она включает в себя процессы плазменного напыления с модулируемой косвенной дугой и обработки поверхности модулируемой прямой дугой. Новым в физ. модели является учет модуляции мощности выносной дуги плазмотрона в процессе напыления. Это создает условия, при которых покрытие дискретно (точечно) дополнительно проплавляется в локальных участках равномерно по поверхности за счет модуляция мощности выносной дуги, что приводит к повышению прочностных свойств покрытия. На основе физической модели была разработана математическая модель комбинированного двухдугового процесса плазменного напыления [14, 15], которая включает в себя систему дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих взаимодействие и движение дискретных элементов покрытия (частиц покрытия); движение дискретных элементов покрытия; кинетическую энергию дискретного элемента; теплообмен между контактирующими дискретными элементами покрытия, параметры ролика в модели; электропроводность между дискретными элементами покрытия с поверхностью основы. Данная модель была реализована одним из численных методов (модифицированным методом Эйлера-Коши [15]. Модель реализована на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7. С помощью разработанной модели были проведены серии компьютерных экспериментов и получены искомые зависимости от параметров модуляции. Последовательность проведения компьютерного эксперимента включала в себя нанесение и упрочнение двух слоев покрытия, после чего выполнялась оценка физико-механических свойств сформировавшегося покрытия.

Исходя из теоретических положений сварочных процессов академика Рыкалина Н. Н. получены выражения, определяющие условия локального проплавления покрытия в зависимости от теплового потока к нему (от параметров модуляции прямой дуги) [18].

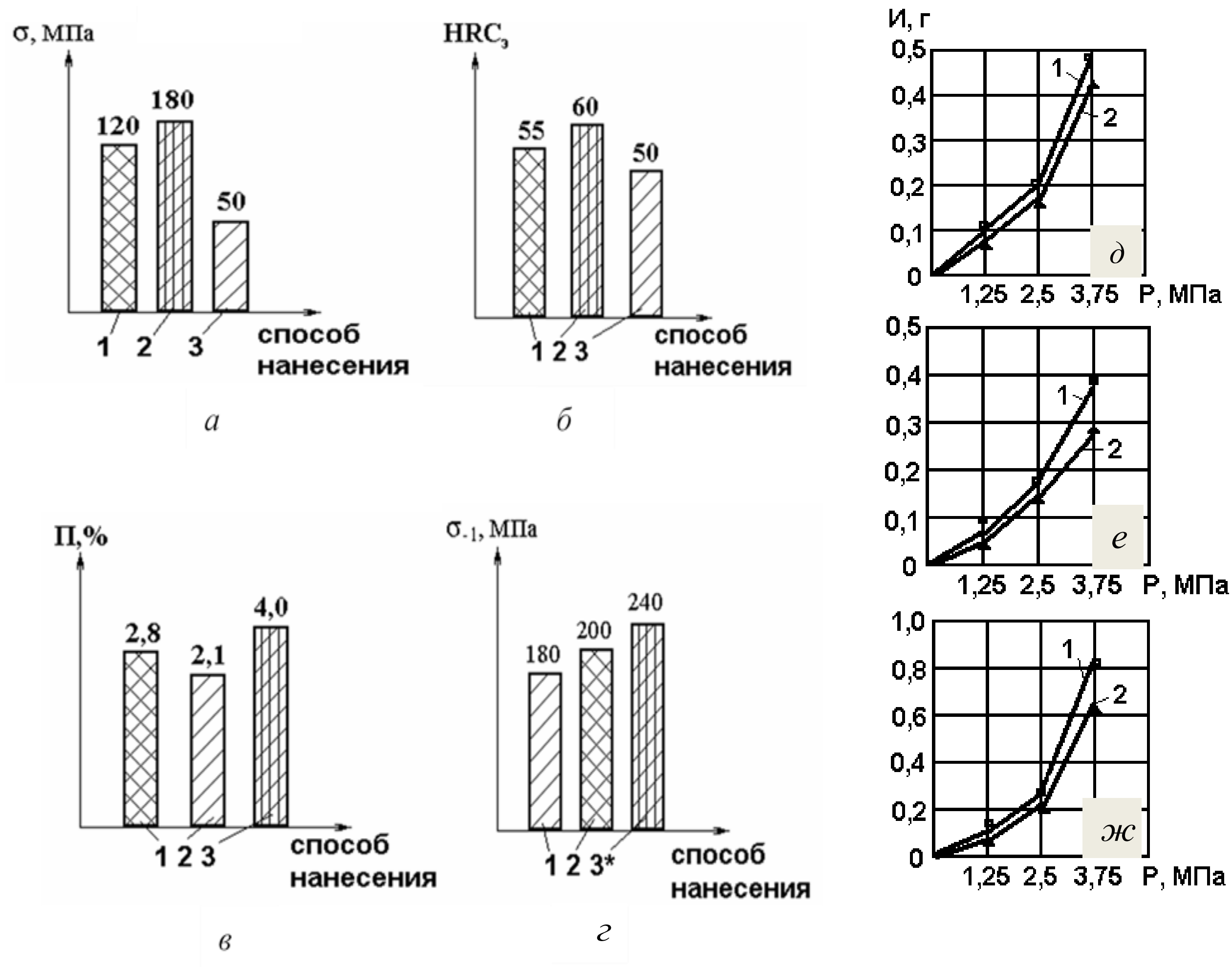
В результате теоретической проработки на основе моделирования были получены оптимальные параметры процесса плазменного нанесения покрытий с модуляцией мощности выносной дуги. Для исследования использовалось экспериментальное оборудование лаборатории плазменного напыления кафедры машиностроительных технологий [13]. Напыление на внутренние поверхности цилиндров реализуется по известной схеме вращения плазмотрона [19]. Схема поворотного блока, на который устанавливается плазмотрон, и схема самого плазмотрона описаны в работе [19].

3 Результаты исследований

Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и износостойкости покрытий, полученных плазменным напылением на призматические образцы, имитирующие условия работы пары «цилиндр-кольцо поршня», с модуляцией электрических параметров плазмотрона на оптимальных режимах, представлены на рис. 8. Результаты показывают, что в сравнении с базовым вариантом прочность соединения покрытия с основой, определенная методом сдвига, возрастает на 45-50 %, микротвердость, определенная на твердомере ПМТ-3, показала рост величины на 10-15 %, износостойкость, определенная на машине трения для возвратно-поступательного движения [10, 18] – на 16-26 %.

В табл. 1 и рис. 9 представлены данные порошков на основе Ni и Cr с флюсующими добавками Si и B и их полученная износостойкость для различных давлений в зоне трения. Микроструктура шлифа образца с комбинированным покрытием показала плотную структуру покрытия и наличие упрочняющих фаз в покрытии (бейнита и мартенсита) [7, 20].

На основании теоретических и экспериментальных исследований усовершенствован технологический процесс, получены рекомендации по восстановлению цилиндров с модуляцией мощности выносной дуги с использованием регулируемого переменного состава материала покрытия и разработаны технологические средства для него.

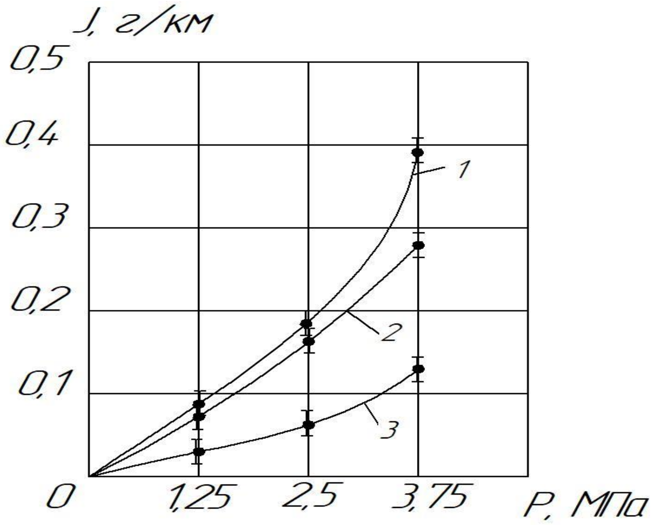


а, б, в, г – зависимости прочности соединиения покрытия с основой, твердости, пористости покрытия и предела выносливости образцов с покрытием от способа нанесения покрытия соответственно; *д, е, ж* – износ *И* призматических образцов при скорости трения *V*, равной 0,78 м/с, 1,3 м/с и 2,6 м/с соответственно; *Р* – давление в зоне трения; *1, 2* – покрытие, полученное напылением-наплавкой двумя дугами (косвенной и выносной) без модуляции и с модуляцией соответственно; *3* – традиционно напыленное покрытие; П – пористость; σ – прочность соединения покрытия с основой

Рисунок 8 – Результаты исследований физико-механических свойств и интенсивности изнашивания никель-хромовых покрытий ПГСР-4

Таблица 1 – Материал порошков

Марка сплава	Состав	Тпл. ^{0}C	HRC	Свойства покрытий
ПР-Н65Х25С3Р2	Ni·1.2C·25Cr·2.7Si·2.5B	1050	45-55	Высокая износостойкость, высокая коррозионная устойчивость и жаростойкость, хорошая прочность сцепления. Твёрдость и износостойкость сплавов возрастает, а сопротивление удару падает по мере увеличения в них содержания углерода, бора и кремния.
ПР-Н77Х15С3Р2	Ni·0.5C·15Cr·3.2Si·2B	1050	37-45	



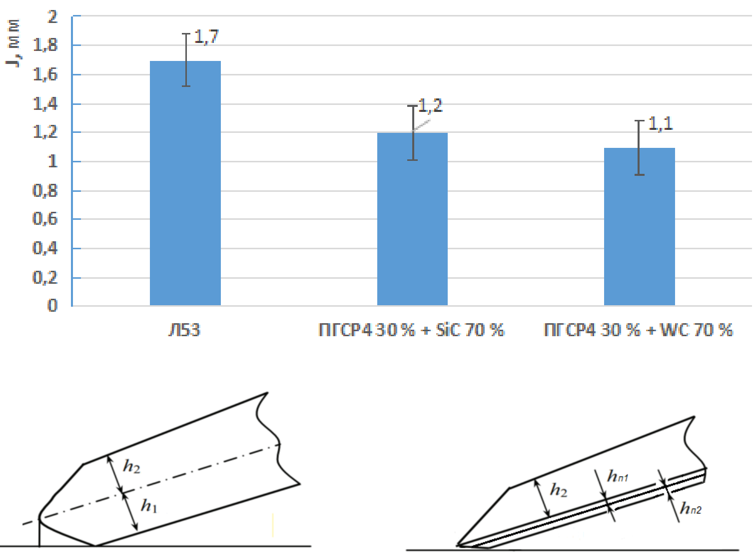
1 – ПР-Н65Х25С3Р2;
2 – ПР-Н65Х25С3Р2+ПР-Н77Х15С3Р2 без финишного плазменного упрочнения;
3 – та же смесь порошков с финишным плазменным упрочнением;
v = 0,7 м/с

Рисунок 9 – Зависимость интенсивности изнашивания J от удельного давления P [20]

На рис. 10 представлены результаты исследований интенсивности изнашивания образцов из стали Л53 для двухслойного самозатачиваемого покры-тия, включающего в себя карбиды вольфрама и/или кремния. Для лабораторных испытаний использовался расточной станок 2Е78П с установленной на станине емкости радиусом 250 мм и высотой 420 мм, заполненной кварцевым песком (100-500 мкм), включащий шпиндель с вращающейся резцедер-жательной головкой, к которой с помощью кронштейнов крепились исследуемые образцы. Принципиальная схема установки для исследования износа элементов почвообрабатывающих рабочих органов в рыхлом слое абразивных частиц представлена на рис. 11 [21].

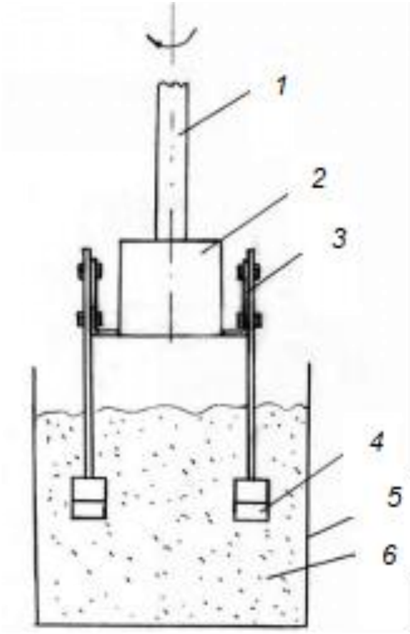
Скорость вращения составляла 30 об/мин, что соответствовало линейной скорости образцов 0,5 м/с. Путь трения составил 3000 м, время испытаний – 100 мин. Результаты испытаний (по 4 образца на одно сочетание параметров покрытий) показали повышение стойкости к изнашиванию не менее 1,5 раз. При этом профиль заточки лезвий оставался практически неизменным (угол между кромками лезвия не менялся).

Состав материалов стали Л53 и слоев покрытий представлены в табл. 2-3.



а *б*

Рисунок 10 – Интенсивность изнашивания образцов и изношенные профили лезвия лемеха из материала Л53 (а) и двухслойного самозатачивающегося материала (слои h_1 и h_2 с карбидами SiC или WC, HRC h_1 > HRC h_2) (б)



1 – шпиндель станка; *2* – резцедержательная головка; *3* – кронштейны крепления испытываемых элементов; *4* – испытываемые элементы; *5* – емкость для абразивного материала; *6* – абразивный материал; радиус вращения образцов – 150 мм; частота вращения 30 об\мин; размеры образцов – 20х30 мм

Рисунок 11 – Схема установки для исследования износа элементов почвообрабатывающих рабочих органов в рыхлом слое абразивных частиц

Таблица 2 - Материал лемеха Л53

Материал основы	Химический состав, %					Твердость, HRC	Относительная износостойкость*, ε
	C	Si	Mn	Cr	Прочие		
Л53 (ГОСТ 12492.0-90)	0,47	0,25	0,67	0,14	—	47	1,7

* абразив - кварцевые зерна размером 0,16...0,32 мм

Таблица 3 - Материалы слоев покрытий

Вариант	Слой покрытия	Материал покрытия	Толщина слоя, мм
1	1 - высокотвердый	ПГСР4 30% + WC 70 %	2
	2 - твердый (нижний наружный)	ПГСР4	3
2	1 - высокотвердый	ПГСР4 30% + SiC 70 %	2
	2 - твердый (нижний наружный)	ПГСР4	3

Таблица 4 – Состав материалов покрытий образцов

Материал покрытия	Химический состав, %					Твердость слитка, HRC	Относительная износостойкость*, ε
	C	Si	Mn	Cr	Прочие		
ПГСР4	0,47	0,25	0,67	0,14	—	47	1,7
WC	0,65	0,25	1,0	0,14	Ni-0,20 Cu-0,18	~90	1,9
SiC	< 0,4	-	-	-	Fe < 0,7	~90	1,9

* абразив - кварцевые зерна размером 0,16...0,32 мм

Восстановление рабочих поверхностей цилиндров двигателей КАМАЗ-740 с помощью плазменного нанесения покрытий с модуляцией мощности плазмотрона и использования регулирования переменного состава покрытия позволило получить технико-экономически

108000 р. при годовой программе 1000 ед. в сравнении с технологией традиционного плазменного напыления. Оценка срока экономической окупаемости затрат на нанесение износостойких материалов покрытия на режущие кромки составила 1 год с учетом повышения ресурса лемехов при снижении тяговых усилий (и соответствующей мощности и работы) движителя.

4 Обсуждение и заключение

Управление составляющими комбинированного процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий переменного состава с использованием модуляции параметров позволяет обеспечивать заданную долговечность изнашиваемых поверхностей трения и сопряжений:

– для деталей пар трения с помощью комбинированного процесса плазменного напыления-наплавки самофлюсующегося порошка переменного состава на основе Ni, Cr с вариациями B и Si и последующей термо- или электромеханической обработки;

– для режущих кромок рабочих органов с помощью плазменной наплавки порошковой смеси переменного состава, включающего самофлюсующийся порошок на основе Ni+Cr и WC или CrC.

Анализ информации по технологиям восстановления цилиндров ДВС автомобилей нанесением покрытий показал ограниченность традиционных технологий по их производительности и качеству получаемых покрытий. К числу основых причин указанных недостатков являются то, ранее не учитывалась возможность обеспечения равномерности изнашивания рабочей поверхности цилиндра на всех его участках, что не позволяло увеличить ресурс цилиндра. Данную задачу предложено решать регулированием добавления высокоизносостойкого порошка к основному менее износостойкому порошку в зависимости от продольной координаты цилиндра. Использование при этом регулирования скорости подачи плазмотрона позволяет обойтись без операции предварительного шлифования перед напылением покрытия и уменьшить трудоемкость получения покрытия, а также снизить расход порошковой смеси.

Предложено совершенствование плазменного нанесения покрытий с помощью использования модуляции мощности плазмотрона при восстановлении цилиндров, что позволяет повышать прочность соединения покрытия с основой до заданных значений.

Результаты исследований показали заметное преимущество нового метода плазменного нанесения покрытий с модуляцией мощности плазмотрона в сравнении с традиционным плазменным напылением, заключающееся в снижении удельных производственных расходов на их восстановление, в том числе за счет использования переменного состава порошковой смеси при напылении, на 19 % по сравнению с традиционной технологией с заметным экономическим эффектом.

Двух- и многослойные режущие элементы рабочих органов машин позволяют обеспечивать повышение их износостойкости и стабильности качества выполняемых работ за счет эффекта самозатачиваемости, вследствие чего обеспечивается стабильность тягового сопротивления и потребляемой мощности движителя. Лаборатрные исследования изнашивания образцов из стали Л53 без покрытий и с карбидными покрытиями в условиях песчаной среды показали повышение износостойкости последних в 1,5 и более раз. При этом профиль сечения лезвия не менялся (угол между кромками лезвия не менялся). Оценка срока экономической окупаемости затрат на нанесение износостойких материалов покрытия составила 1 год с учетом повышения ресурса лемехов при снижении тяговых усилий (и соответствующей мощности и работы) движителя.

Список литературы

1 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белащенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408 с. – ISBN 5-02-006040-2.

2 Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов и др. М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

3 Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». - 2-е изд., перераб. и доп. -

М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 360 с.

4 Балдаев, Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. Москва, Изд-во «КХТ», 2004. – 134 с.

5 Кравченко, И. Н. Разработка технологии нанесения плазменных покрытий многофункционального назначения / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, Ю. А. Шамарин, Т. А. Чеха // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2017. №6(82). – С. 63-71.

6 Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

7 Kadyrmetov, A.M. Peculiarities of processes of gas-flame application and strengthening of variable composition coatings on friction assemblies / Anvar Kadyrmetov, Julia Simonova, Mikhail Heifitz, Svetlana Yakenko // Materials Today: Proceedings doi: 10.1016 / j. matpr.2020.08.208. – pp. 1-10, - Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320360740?via%3Dihub .

8 Кадырметов, А. М. Современные технологии плазменных и газотермических процессов нанесения покрытий в открытой атмосфере / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, А. А. Плахотин, Д. В. Колмаков // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции (28 декабря 2019 года) / Юго-Зап. гос. ун-т.; в 2-х томах. Том 1. – Курс: Юго-Зап. гос.ун-т, 2019. – С. 226-238.

9 Кадырметов, А. М. Управление эффективностью газодинамических процессов газопламенного напыления / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, Е. В. Снятков, А. А. Плахотин // В сборнике: Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении. Материалы XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей. 2020. – С. 45-56.

10 Кадырметов, А. М. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах [Текст] / А. М. Кадырметов, Станчев Д. И., Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №7(67). – С. 29-36.

11 Сухочев, Г. А. Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой [Текст] / Г. А. Сухочев, О. Н. Кириллов, А. М. Кадырметов, Д. М. Небольсин, Е. Г. Смольянникова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. - №8(68) . – С. 39-44.

12 Кадырметов, А. М. Методы плазменного, с модуляцией электрических параметров, нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов // Автомобильная промышленность. – 2010. – №8 С. 37-39.

13 Кадырметов, А. М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров [Текст] / А. М. Кадырметов, Станчев Д. И., Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №11(71) . – С. 41-48.

14 Кадырметов, А. М. Физическая модель механизмов динамизации процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий с помощью модуляции электрических параметров [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев, Д. А. Попов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – №10. – С. 19-26.

15 Кадырметов, А. М. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий на детали транспортных машин в режиме модуляции мощности дуги плазмотрона / А. М. Кадырметов, М. В. Драпалюк, В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №10(84). – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/19.pdf, 0,625 у.п.л.

16 Кадырметов А. М. Математическая модель тепловых процессов плазменного напыления с электромеханической обработкой покрытий / А. М. Кадырметов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета

(Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №04(88). – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/24.pdf , 1,438 у.п.л.

17 Кадырметов, А. М. Моделирование качества покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №8. – С. 39-43.

18 Кадырметов, А. М. Упрочнение напыляемых плазменных покрытий импульсной модуляцией мощности выносной дуги плазмотрона [Текст] / А. М. Кадырметов, Е. В. Смоленцев, А. Ф. Мальцев, Г. А. Сухочев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 336-341.

19 .Кадырметов, А. М. Технологическое обеспечение восстановления типовых деталей ДВС плазменным нанесением и упрочнением покрытий / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Н. Бухтояров, К. А. Радыгин, А. К. Андрющенко, И. А. Кичатов // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – №2 (32). – С. 177-190. Режим доступа : http://vestnikvglta.ru/gallery/177-190.pdf

20 Симонова, Ю.Э. Технология нанесения на рабочие поверхности узлов трения покрытий переменного состава / Ю. Э. Симонова // Автореф. дис.на соискание уч. степени канд. техн. наук. - Воронеж, 2020. - 19 с.

21 Фаюршин, А.Ф. От полевых испытаний к лабораторным / А.Ф. Фаюршин, Р. Ф. Масягутов, А. Д. Мусин // Достижения науки и инновации для аграрного производства : материалы национальной научной конференции, 8-9 февраля 2016 г. - Уфа : Башкирский ГАУ, 2016. - С. 148-155.

References

1 Kudinov, V.V. Plasma coating / V.V. Kudinov, P.Yu. Pekshev, V.E. Belashchenko, etc. - M.: Nauka, 1990. - 408 p. – ISBN 5-02-006040-2.

2 Suslov, A. G. Surface engineering of parts / A. G. Suslov, V. F. Bezyazychny, Yu. V. Panfilov, etc. M.: Mechanical Engineering, 2008. – 320 p.

3 Puzryakov, A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology: Textbook. manual for the course “Technology of structures made of metal composites.” - 2nd ed., revised. and additional - M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2008. - 360 p.

4 Baldaev, L.Kh. Renovation and strengthening of machine parts using thermal spraying methods. Moscow, KHT Publishing House, 2004. – 134 p.

5 Kravchenko, I. N. Development of technology for applying multifunctional plasma coatings / I. N. Kravchenko, M. A. Glinsky, Yu. A. Shamarin, T. A. Chekha // Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agricultural Engineering University named after V.P. Goryachkin.” 2017. No. 6(82). – P. 63-71.

6 Hasui A., Morigaki O. Surfacing and spraying. M.: Mechanical Engineering, 1985. 240 p.

7 Kadyrmetov, A.M. Peculiarities of processes of gas-flame application and strengthening of variable composition coatings on friction assemblies / Anvar Kadyrmetov, Julia Simonova, Mikhail Heifitz, Svetlana Yakenko // Materials Today: Proceedings doi: 10.1016 / j. matpr.2020.08.208. – pp. 1-10, - Access mode: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320360740?via%3Dihub.

8 Kadyrmetov, A. M. Modern technologies of plasma and gas-thermal coating processes in an open atmosphere / A. M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, A. A. Plakhotin, D. V. Kolmakov // Modern materials, equipment and technology : collection of scientific articles of the 9th International Scientific and Practical Conference (December 28, 2019) / South-West. state University; in 2 volumes. Volume 1. – Course: South-West. State University, 2019. – pp. 226-238.

9 Kadyrmetov, A. M. Control of the efficiency of gas-dynamic processes of gas-flame spraying / A. M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, E. V. Snyatkov, A. A. Plakhotin // In the collection: Innovative technologies in transport and chemical engineering. Materials of the XII International Scientific and Technical Conference of the Association of Mechanical Technologists. 2020. – pp. 45-56.

10 Kadyrmetov, A. M. Technology of plasma application and hardening of coatings in resource-saving production processes [Text] / A. M. Kadyrmetov, Stanchev D. I., G. A. Sukhochev // Hardening technologies and coatings. – 2010. – No. 7(67). – pp. 29-36.

11 Sukhochev, G. A. Technological assurance of the quality of application of protective coatings by combined processing [Text] / G. A. Sukhochev, O. N. Kirillov, A. M. Kadyrmetov, D. M. Nebolsin, E. G. Smolyannikova // Strengthening technologies and coatings. – 2010. - No. 8(68). – pp. 39-44.

12 Kadyrmetov, A. M. Methods of plasma, with modulation of electrical parameters, application and hardening of coatings [Text] / A. M. Kadyrmetov // Automotive industry. – 2010. – No. 8 P. 37-39.

13 Kadyrmetov, A. M. Equipment for plasma application and hardening of coatings with modulation of electrical parameters [Text] / A. M. Kadyrmetov, Stanchev D. I., G. A. Sukhochev // Hardening technologies and coatings. – 2010. – No. 11(71). – pp. 41-48.

14 Kadyrmetov, A. M. Physical model of the mechanisms of dynamization of processes of plasma deposition and hardening of coatings using modulation of electrical parameters [Text] / A. M. Kadyrmetov, G. A. Sukhochev, A. F. Maltsev, D. A. Popov / / High technologies in mechanical engineering. – 2013. – No. 10. – pp. 19-26.

15 Kadyrmetov, A. M. Modeling the process of plasma spraying of coatings on parts of transport vehicles in the mode of modulating the power of the plasmatron arc / A. M. Kadyrmetov, M. V. Drapalyuk, V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov // Polythematic Network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubSAU) [Electronic resource]. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – No. 10 (84). – Access mode: http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/19.pdf, 0.625 u.p.l.

16 Kadyrmetov A. M. Mathematical model of thermal processes of plasma spraying with electromechanical processing of coatings / A. M. Kadyrmetov // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific journal of KubSAU) [Electronic resource]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – No. 04 (88). – Access mode: http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/24.pdf, 1,438 u.p.l.

17 Kadyrmetov, A. M. Modeling the quality of coatings obtained by plasma spraying with simultaneous electromechanical processing [Text] / A. M. Kadyrmetov, G. A. Sukhochev, A. F. Maltsev // Hardening technologies and coatings. – 2013. – No. 8. – P. 39 43.

18 Kadyrmetov, A. M. Strengthening of sprayed plasma coatings by pulse modulation of the power of the external arc of a plasmatron [Text] / A. M. Kadyrmetov, E. V. Smolentsev, A. F. Maltsev, G. A. Sukhochev // Bulletin of the Voronezh State Technical University university. – 2014. – T. 10. – No. 1. – P. 336-341.

19 Kadyrmetov, A. M. Technological support for the restoration of standard internal combustion engine parts by plasma application and hardening of coatings / A. M. Kadyrmetov, E. V. Snyatkov, V. N. Bukhtoyarov, K. A. Radygin, A. K. Andryushchenko, I. A. Kichatov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – No. 2 (32). – pp. 177-190. Access mode: http://vestnik-vglta.ru/gallery/177-190.pdf .

20 Simonova, Yu.E. Technology of applying coatings of variable composition to the working surfaces of friction units / Yu. E. Simonova // Author's abstract. diss. for academic qualifications Ph.D. degrees tech. Sci. - Voronezh, 2020. - 19 p.

21 Fayurshin, A.F. From field tests to laboratory tests / A.F. Fayurshin, R.F. Masyagutov, A.D. Musin // Achievements of science and innovation for agricultural production: materials of the national scientific conference, February 8-9, 2016 - Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2016. - pp. 148-155.