



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ С ИМПУЛЬСНОЙ
МОДУЛЯЦИЕЙ ТОКА ДУГИ**

✉¹**Кадырметов Анвар Минирович**
доктор технических наук, зав. кафедрой
машиностроительных технологий
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ
e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Снятков Евгений Вячеславович
кандидат технических наук,
доцент кафедры производства, ремонта и
эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронеж-
ский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова», г. Во-
ронезж, РФ

Плахотин Александр Александрович
аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Мандрыкин Игорь Александрович
аспирант 2 курса машиностроительного фа-
культета ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Буренко Никита Сергеевич
студент 3 курса машиностроительного фа-
культета ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Аннотация.

Обоснованы направления исследований при
разработке процесса плазменного напыле-
ния покрытий. Теоретическое основание со-
вершенствования технологии плазменного
напыления.

**PERSPECTIVE DIRECTIONS
OF IMPROVEMENT OF PLASMA
SPRAYING TECHNOLOGY WITH P
ULSE MODULATION OF
THE ARC CURRENT**

✉¹**Kadyrmetov Anvar Minirovich**
doctor of technical sciences, professor head.
department of engineering technologies Federal State
Budget Educational Institution of Higher Education
"Voronezh State University of Forestry and Technol-
ogies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF
e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Snyatkov Evgenii Vyacheslavovich
candidate of technical sciences, associate
professor of production, repair and operation of
cars Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education "Voronezh State University
of Forestry and Technologies named after G.F.
Morozov", Voronezh, RF

Plahotin Aleksandr Aleksandrovich
graduate student, Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education "Voronezh State
University of Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov", Voronezh, RF

Mandrikin Igor Aleksandrovich
2nd year postgraduate student of the faculty of
mechanical engineering, Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education "Vo-
ronezh State University of Forestry and Technol-
ogies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Burenko Nikita Sergeevich
3rd year student of the faculty of mechanical
engineering, Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education "Voronezh
State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Annotation.

The directions of research in the development of
the process of plasma spraying of material are
substantiated. The theoretical basis for improv-
ing the technology of plasma spraying.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, МОДУЛЯЦИЯ ТОКА, СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ. **Keywords:** PLASMA SPRAYING, CURRENT MODULATION, COATING PROPERTIES.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Существенным недостатком традиционных установок для плазменного напыления является то, что в них используются дорогие и дефицитные плазмообразующие газы, такие как аргон, водород, гелий, азот и их смеси. Там же, где не требуется высокой химической чистоты покрытий, практический интерес вызывает использование в качестве плазмообразующего газа воздуха. При этом для снижения количества окислов в покрытии и повышения энthalпии плазменной струи используют газоздушные смеси с добавлением в воздух пропана или природного газа.

Таким образом, актуальной задачей является усовершенствование установок плазменного напыления, работающих на дешевых плазмообразующих газах – воздухе и его смесях с различными присадками. Перспективными способами усовершенствования плазменного напыления являются динамизация газодинамических процессов модуляцией мощности дуги плазмотрона [1, 2], мощное акустическое воздействие на дугу и струю внешними источниками [3-5] и их сочетание с добавлением в плазмообразующий газ различных присадок.

В связи с этим актуальным является разработка электродуговых воздушно-плазменных установок с модулятором тока дуги плазмотрона.

Известно, что на энергообмен в системе «дуга – плазменная струя – обрабатываемый материал» можно влиять воздействием на дугу или плазменную струю мощным воздействием акустического поля генерацией ударных волн [3-9]. При этом источником энергии для этого может служить либо сама дуга, горящая в режиме модуляции источника питания, либо источник внешнего воздействия (генератор акустического поля). В отличие от акустического внешнего поля использование динамизации газодинамических процессов в двухфазном плазменном потоке с помощью модулятора мощности электрической дуги плазмотрона позволяет проще реализовать эффективное воздействие на поток без изменения конструкции плазмотрона, а также усилить воздействие на поток при генерации ударных волн.

При акустическом воздействии на дугу плазмотрона и плазменную струю интенсивностью более 150 Дб усиливается энергообмен в общей системе «дуга – плазмообразующий газ – обрабатываемый материал», так как турбулизация течения способствует увеличению коэффициента теплоотдачи к обрабатываемому материалу [3-5]. Последнее повышает производительность процесса и делает его более экономичным. При обработке дисперсного материала (для плазменного напыления) дополнительно возможно трехкратное увеличение коэффициента лобового сопротивления напыляемых частиц [6] и, вследствие этого, их скорости. Помимо этого, при воздействии на плазменную струю мощным акустическим полем возможна интенсификация дробления напыляемых частиц [7]. В результате дробления образуются менее инерционные мелкие частицы, которые легче нагреваются и ускоряются. Все это приводит к повышению качества покрытия и эффективности процесса.

Ударно-волновое воздействие на электрическую дугу плазмотрона и плазменную двухфазную струю позволяет дополнительно в сравнении с акустическим случаем повысить энергообмен между дугой и дисперсным материалом (частицами). Этому способствует скачкообразное усиление температуры и давления с плотностью на фронте ударной волны и дополнительно, при наличии присадок в плазменной струе, приводит к экзотермическому увеличению энергии в плазменной струе (температуре, давлению и скорости) и к детонационному горению с усиленным ударным воздействием [1, 8]. В работе [9] приводятся данные о формировании ударных волн со скоростями, равными 1,7-3,0 чисел Маха, при генерирова-

нии импульсов тока с амплитудами тока и напряжения до 10 кА и 3 кВ соответственно при длительностях 50-300 мкс. Это вызывало на фронте ударной волны скачкообразный рост давления в 3,2-10,4 раза, плотности - в 2,4-5,6 раз, температуры – в 1,45-2,76 раз. По оценкам, приведенным в работе [6], это может повысить коэффициент лобового сопротивления дисперсных частиц в плазменной струе в 2-15 раз, что приводит к срыву пограничного слоя с частиц и соответственно – к росту скорости частиц и теплоподводу к ним [10].

При генерации ударных волн в плазменной струе с помощью дуги (точнее, с помощью импульсного модулятора тока дуги) резкое изменение электрической мощности дуги вызывает резкое выделение джоулева тепла в самой дуге [13-15]. Поскольку поверхность дуги свободна, то интенсивное выделение в ней тепла вызывает резкое расширение дугового столба, который как поршень толкает окружающий его плазмообразующий газ («тепловое давление»). Это позволяет при однополярной импульсной модуляции регулировать тепловой коэффициент нагрева плазменной струи в пределах $\pm 20\%$, а эрозию электродов – в пределах одного порядка [12].

Использование однополярной импульсной модуляции при плазменном напылении позволяет повысить твердость покрытия на 55 ... 60 %, прочность сцепления его с основой при напылении порошка – на 15 ... 40 % и понизить газопроницаемость покрытия на порядок [13].

В результате повышается эффективность плазменной обработки материалов с помощью интенсивного волнового воздействия на плазменную струю и более рационально используется энергия дуги. Однако в этом процессе исследована только часть аспектов плазменной обработки материалов при однополярной модуляции.

Важный интерес вызывает также повышение эффективности процесса плазменной наплавки с помощью модуляции мощности выносной дуги плазмотрона и гибридного процесса плазменного напыления – наплавки [16]. Покрытия, эксплуатирующиеся в условиях высоких динамических нагрузок, в свою очередь, требуют дополнительного упрочнения, в качестве которого целесообразно в силу достоинств использовать процессы тепло- и электро-механического упрочнения [17, 18], а для профильных поверхностей – виброабразивное шлифование и / или струйно-динамический способ упрочнения микрошариками [19-21].

2 Материалы и методы

Для исследований плазменного напыления при динамизации газодинамических процессов модуляцией мощности электрической дуги плазмотрона была создана установка плазменного напыления, содержащая модулятор однополярных и двухполярных импульсов. Устройство и принцип действия установки мощностью 10 ... 50 кВт описаны в работах [14, 15, 22].

Возможности усовершенствованной плазменной установки в отношении электрических параметров показали, что: разработанная электрическая схема модулятора в сочетании с заданным источником питания обеспечивает генерацию импульсов прямой полярности с амплитудой 1,2 кА при 0,5 кВ. Для случая необходимости генерации более мощных импульсов потребуются разработка нового модулятора в сочетании с более мощным источником питания.

Силовые параметры системы «модулятор – дуга – дроссель» определяются индуктивностью дросселя, который в 1,2 ... 1,7 раза способен снизить амплитуду импульсов.

При изменении расхода воздуха и параметром управления модулятора можно изменять амплитуды импульсов в широком диапазоне, примерно в 1,5 ... 17 раз, а изменение частоты модуляции позволяет регулировать мощность дуги в 1,2 ... 2,5 раза.

Применение двухполярной импульсной модуляции обеспечивает более чем 3-х кратное повышение энергоемкости в импульсе в сравнении с аналогичной схемой однополярной модуляции.

Повышение производительности по расходу воздуха обеспечивает снижение продолжительности действия импульсов при прямой полярности и рост амплитуды импульса при обратной полярности.

Использование воздушно-пропановой смеси в качестве плазмообразующего газа в стехиометрическом соотношении без включения модулятора приводит к пульсациям тока и напряжения электрической дуги плазмотрона с частотой 1,1 ... 1,3 кГц и разбросом импульсов тока 25 ... 45 А; одновременно суммарный разброс импульсов напряжения дуги увеличивается в 1,2 ... 1,7 раз.

Опытные наблюдения за параметрами газодинамического процесса, происходящего при плазменном напылении, выполняемом на установке, позволили наблюдать следующие особенности:

- слабым по интенсивности ударным волнам (с амплитудой давления 5,2 кПа и скоростью по числу Маха $M = 1,05$) на дистанции 50 мм от торца плазмотрона соответствовали импульсы тока и напряжения на дуге с амплитудами 950 А и 290 В и продолжительностью действия импульса 210 мкс; средняя мощность дуги 11,5 кВА амплитуда мощности импульса составляла 260 кВА;

- происходит активное снижение интенсивности ударных волн из-за повышенной турбулентности газового потока; максимальная величина импульса давления в канале плазмотрона, полученная в результате расчета в 14,3 кПа снизилась в 2,7 ... 4,1 раз на расстоянии 50 ... 70 мм от торца сопла и в (табл. 1);

Таблица 1 – Параметры генерируемых плазмотроном волн в режиме импульсной модуляции мощности дуги [14] (балластное сопротивление источника питания $R_{\delta} = 3,64$ Ом; среднее напряжение на дуге $U_{cp} = 100$ В; средний ток дуги $J_{cp} = 115$ А; сопротивление модулятора прямой полярности $R_{+} = 0,05$ Ом; емкость модулятора прямой полярности $C_{+} = 40$ мкФ; расход плазмообразующего воздуха $Q_{возд} = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м³/с)

Расположение акустического датчика по оси плазмотрона	Амплитуда пульсации давления, Па	Отношение статистического давления за фронтом волны P_2 к давлению перед фронтом P_1 (P_2 / P_1)	Число Маха M (отношение местной скорости потока к скорости звука возмущенной среды)
Ближний (50 мм от среза сопла плазмотрона)	5223	1,522	1,203
Дальний (70 мм от среза сопла плазмотрона)	3482	1,348	1,140

- импульсная ударная волна, возникающая в потоке, способствует повышению турбулентности. В результате этого, в потоке появляются высокочастотные пульсации;

- из-за импульсной модуляции существенно увеличиваются скорость и температура плазменной струи и частиц на 40 ... 60 %;

- отмечен рост температуры и скорости струи и частиц на 15 ... 35 % при внесении 50 % пропана в газовый состав.

3 Результаты исследований

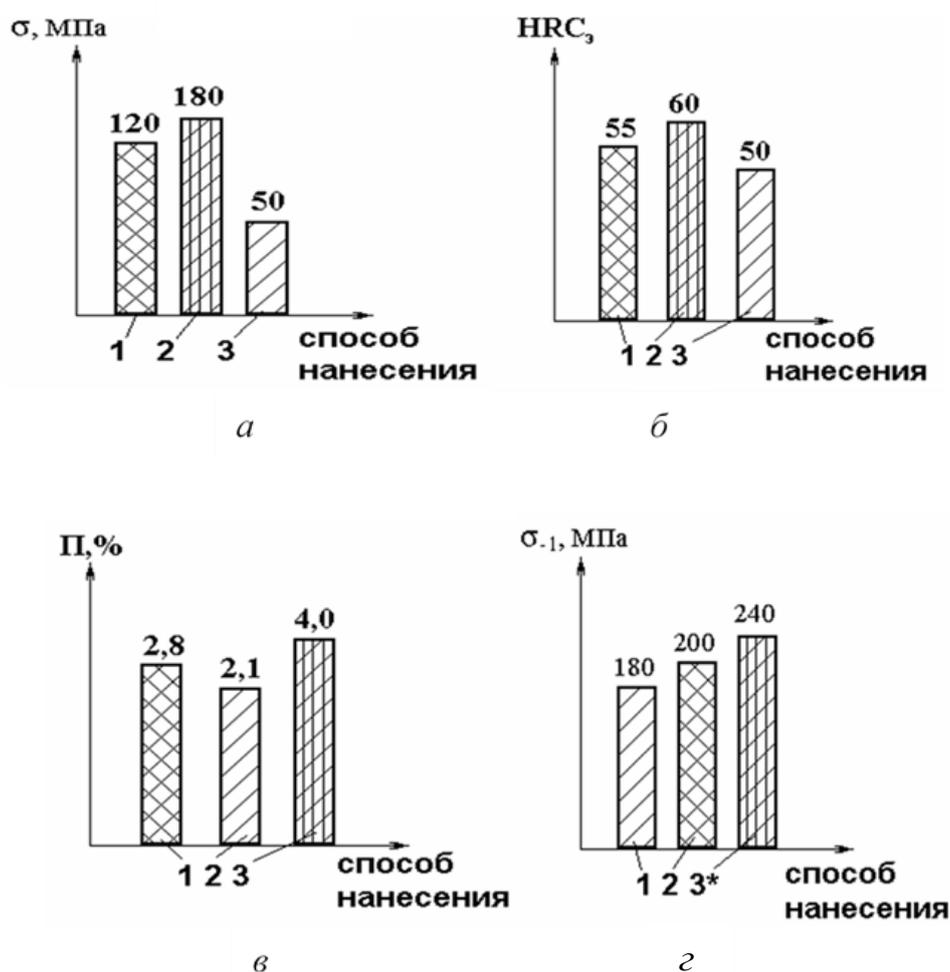
Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и износостойкости покрытий при импульсной модуляции мощности дуги плазмотрона и использовании воздушно-пропановой смеси в качестве плазмообразующего газа представлены в таблицах 2, 3 и рисунке 1, из которых видна возможность снижения газопроницаемости покрытия в 4-10 раз и увеличения прочности сцепления с основой в 1,5-2 раза, износостойкости – в 1,14-1,9 раз и квазитвердости – в 1,2-1,7 раз.

Упрочнение покрытий позволяет повысить эксплуатационные нагрузки для случаев

знакопеременных и ударных воздействий. Эти требования могут быть удовлетворены применением термо- и электромеханической обработки покрытий. Их использование позволяет повысить твердость, прочность сцепления с основой и количество циклов до разрушения (по ГОСТ 25.502-79) на 8-20 %, 30-100 % и 10-20 % соответственно.

Применение модуляции импульсов тока дуги плазмотрона и введение в плазмообразующий газ метана или пропана показало наличие технико-экономического эффекта, но для промышленного использования необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований с учетом недостатков, выявленных на этапе предварительных опытов, их корректировки и усовершенствования установки. Необходимо:

- использовать наиболее мощные высокочастотные тиристоры для работы на токах с амплитудой более 1 кА;
- разработать источник питания с модулятором и плазмотрон, позволяющие генерировать в плазмотроне сильные ударные волны и работать на таких режимах;
- повышать электроэрозионную стойкость катода в условиях работы при генерировании импульсов силы тока до 900 А прямой полярности с целью обеспечения ресурса электродов до 100 ч и стабильности процесса.



1, 2 – покрытие, полученное напылением-наплавкой двумя дугами (косвенной и выносной) без модуляции и с модуляцией соответственно; 3 – традиционно напыленное покрытие; 3* – сталь 45; П – пористость; σ – прочность соединения покрытия с основой

Рисунок 1 – Сравнение свойств покрытий

Не до конца изучены теоретические вопросы воздействия импульсно модулированной дуги плазмотрона на плазмообразующий газ, плазменную струю. Не изучен теплообмен внутри плазмотрона с модулированной дугой. Не установлены процессы взаимодействия напыляемого материалов с плазменным потоком в канале плазмотрона при подаче в канал плазмотрона и в плазменной струе, учитывая параметры модуляции, структуры самих материалов, плазмообразующих газов, а также присадок к нему. Не известны энергетические соотношения при этом. Для решения этих вопросов требуется изучение физико-химических процессов, протекающих при воздействии на структуру материалов плазмой с модуляцией тока дуги и введением в плазмообразующий газ присадок.

Таблица 2 – Физико-механические свойства покрытий, полученных с помощью плазмотрона с косвенной дугой

Физико-механические свойства покрытий	Напыляемый материал	Режим напыления				
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
		Без модуляции: $L = 160$ мм; $J_{CP} = 150$ А; $Q_{возд} = 1,5 \times 10^3$ м ³ /с (90 л/мин); $Q_{тр} = 0,1 \times 10^{-5}$ м ⁵ /с (6 л/мин)	Без модуляции с добавлением пропана в воздух (дополнительно к № 1) $Q_{проп} = 0,61 \times 10^3$ м ³ /с (3,6 л/мин)	С модуляцией по схеме обратной полярности (дополнительно к № 1) $\Delta J^- = 120$ А; $\tau = 60$ мкс; $v_m = 4$ кГц	С модуляцией по двухполярной схеме (дополнительно к № 1) $\Delta J^- = 120$ А; $\Delta J^+ = 500$ А; $\tau = 60$ мкс; $\tau^+ = 60$ мкс; $v_m = 4$ кГц	С модуляцией по двухполярной схеме и с добавлением пропана в воздух (режим № 2 + № 4)
Прочность соединения покрытия с основой, МПа	ПН55Т45	15 ... 22	19 ... 38	18 ... 37	25 ... 43	35 ... 54
	ПГСР-4	13 ... 20	17 ... 36	18 ... 37	24 ... 43	36 ... 55
	ПН85Ю15	19 ... 26	22...41	22 ... 41	29 ... 48	41 ... 60
Квазитвёрдость покрытия, НРС	ПН55Т45	22	29	25	30	35
	ПГСР-4	23	31	27	34	41
	ПН85Ю15	13	20	16	23	30
Газопроницаемость покрытия, с × см ²	ПН55Т45	120000	102000	95000	81000	65000
	ПГСР-4	111000	97000	91000	76000	59000
	ПН85Ю15	56000	43000	41000	37000	29000
Микротвёрдость покрытия, ГПа	ПН55Т45	Ме 4,5; Окс 9,5	Ме 5,5; Окс 10,4	Ме 4,6; Окс 9,5	Ме 5,4; Окс 10,5	Ме 6; Окс 12,5
	ПГСР-4	8,1	8,4	8,1		9,1
	ПН85Ю15	3,9	4,6	4,1		5,1

Не имеют теоретической проработки исследования, отмечающие эффективность плазменной обработки материалов при совместном использовании модуляции мощности электрической дуги плазмотрона и детонации плазмообразующего газа (при соответствующих присадках).

Исходя из вышеизложенного, необходимо изучить вопросы, которые помогут раскрыть вышеуказанные процессы внутри канала плазмотрона и плазменной струе при динамическом изменении дуги плазмотрона в результате модуляции её мощности и введения в плазмообразующий газ присадок. Прежде всего, необходимо провести дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования модулятора тока дуги плазмотрона с целью повышения его быстродействия (до времен импульсов, не превышающих 10 ... 20

мкс) при максимально возможных с помощью используемого источника питания амплитудах тока. Это позволит расширить частотный диапазон модулятора и усилить генерируемые им волны в плазменной струе. Для этого необходимо провести работы:

1 Проанализировать условия процесса с целью минимизации эрозии электродов плазмотрона.

2 Изучить механизмы энергетических и тепловых процессов в потоке плазменной среды в канале плазмотрона и в плазменной струе в зависимости от факторов модуляции электрической мощности плазмотрона и высокоэнтальпийных углеводородных добавок к плазмообразующему воздуху. Исследовать это влияние при различных геометрических параметрах плазмотрона.

3 Исследовать воздействие импульсно возмущенной плазменной струи с помощью модуляции на дисперсные частицы из различных материалов с целью оптимизации процессов плазменного напыления. Критерием оптимизации здесь является максимальная энергоемкость частиц при минимальной степени их испаряемости.

4 Создать методику расчета, позволяющую выбирать параметры модулятора, плазмотрона и системы газоподачи с присадками в зависимости от обрабатываемого плазмотроном материала. На базе полученных теоретических основ создать основы управления плазменной обработкой напыляемых металлов по химическим и электрическим параметрам установки.

5 Изготовить экономичный источник питания плазмотрона и исследовать его совместную работу с разработанным модулятором. Целью здесь является разработка опытного образца для промышленного использования (имеющийся лабораторный источник питания представляет собой источник напряжения с балластным сопротивлением).

6 Проработать теоретические возможности совмещения полезных эффектов импульсной модуляции электрической мощности дуги плазмотрона и детонации плазмообразующего газа с целью получения сверхсуммарного положительного эффекта.

7 Разработать лабораторный вариант электродуговой плазменной установки с модулятором электрической мощности плазмотрона и внешним источником питания к нему с целью расширения возможностей и усиления положительного эффекта воздействия на напыляемый материал.

Таблица 3 – Физико-механические свойства плазменных покрытий, полученных с помощью косвенной и выносной дугами, с термо- (ТМО) и электромеханической обработкой (ЭМО)

Свойство	ВПН без модуляции	ВПН с модуляцией косвенной дуги	ВПН с выносной дугой без модуляции	ВПН с модуляцией выносной дуги	ВПН с ТМО	ВПН с ЭМО
Прочность соединения, МПа	20*	36*	80-100*	100-120*	20*	20*
Квазитвёрдость. НРС	23-25	41-45	47-45	48-52	54-57	57-62
Микротвёрдость, ГПа	до 8,1	до 9,1	до 10,1	до 10,6	до 13,5	до 20,4
Сопротивление усталости, МПа	170	175	180	210	210	245
Износ ² , г ($S = 3$ км, $v = 1,3$, $P = 2,5$ МПа)	0,88	0,59	0,3	0,27	0,2	0,18

Предполагаемые подходы к решению задачи

1 Исследование модулятора

1.1 Построение математической модели нестационарной системы источник питания дуги – контур модулятора – дуга плазмотрона с обтекающим стабилизирующим её продольно-вихревым плазмообразующим газом» и ее использование.

При модулировании нестационарной дуги предполагается использовать подходы, в которых импульсно модулированная дуга представляется как импульсная дуга в конечной стадии искрового разряда, а также подходы, разработанные М.Е. Заруди [23]. Решение задачи предполагается искать приближенными аналитическими методами расчета дуги и всей системы в линейной постановке. Затем, используя аналитическое решение, необходимо будет найти связи между параметрами столба дуги в продольно-вихревом потоке. С помощью численных методов расчета предстоит выяснить особенности, которые вносит нелинейность свойств плазмы и всего контура «источник питания – модулятор – дуга» на характер процессов. После этого должна быть уточнена модель системы и найдены режимы модуляции, максимизирующие мощности импульсов при их минимальных длительностях.

Затем предполагается провести экспериментальную оптимизацию параметров модуляторов и добавления присадок в плазмообразующий газ и уточнить математическую модель системы «источник питания – модулятор – дуга».

1.2 Разработка теоретической модели взаимодействия импульсно модулированной дуги плазмотрона с его электродами. Используя данную модель, необходимо разработать меры по уменьшению эрозии электродов. При решении этой задачи предполагается использовать подходы, реализующие самовозобновление катода.

2 Изучение влияния импульсной модуляции, геометрии плазмотрона и добавления углеводородсодержащих газов к плазмообразующему газу на теплообмен, газодинамику и химический состав однофазной плазменной струи

Это изучение предполагается проводить экспериментальным путем:

– теплообмен в плазмотроне исследовать с помощью калориметрии охлаждающей электроды воды;

– газодинамику плазменной струи – с помощью датчиков скорости (приемников давления) и температур (термопар); однако данные датчики не позволяют использовать их для областей около среза сопла; желательнее использовать для этого спектроскопические и скоростные теневые оптические методы и приборы;

– химический состав плазменной струй (установившийся равновесный) – с помощью газоанализатора, а в кинетике – с помощью масспектрометра.

3 Влияние импульсно возмущенной плазменной струи на дисперсные частицы в процессах напыления. Эту задачу намечено решать экспериментально с помощью дискового прибора [24, 25] или оптической системы диагностики струи [26] (для определения скорости частиц), калориметра [27] (для определения их температуры), седиментационного и микроскопного анализа (для определения гранулометрического состава напыленного порошка), рентгеноструктурного анализа (для определения примесей в химическом составе материала частиц) [28].

4 Разработка общей математической модели и основ управления плазменной обработки металлов. На базе проведенных экспериментальных исследований построить полуэмпирическую математическую модель системы «дуга – плазменная струя – напыляемые частицы», дополнив её математической моделью системы «источник питания – модулятор – дуга» и создав общую математическую модель. Разработать и создать систему регулирования по параметрам модулятора, расхода плазмообразующего газа и присадок в зависимости от параметров напыляемого порошка и производительности процесса.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты и планируемые исследования позволяют сформулировать основные этапы и ожидаемые результаты по совершенствованию плазменных установок:

1 Исследование модулятора тока дуги плазмотрона, получение математической моде-

ли нестационарной системы «источник питания дуги – контур модулятора – дуга» и разработка мер по уменьшению эрозии электродов.

2 Исследование влияния параметров импульсной модуляции, геометрии плазмотрона и введения присадок в плазмообразующий газовый состав (воздух) на теплообмен и газодинамику однофазной плазменной струи, дающие возможность получения закономерностей на основе эмпирических регрессионных зависимостей температуры, скорости и химического состава струи от указанных параметров.

3 Исследование влияния импульсно возмущенной плазменной струи на напыляемые частицы, дающие возможность получения эмпирических регрессионных зависимостей температуры и скорости напыляемых частиц, а также загрязнения их материала от параметров модуляции.

4 Оптимизация плазменной установки, разработка и создание её системы регулирования.

5 Разработка плазменной установки с экономичным источником питания дуги.

6 Теоретические исследования комбинированного плазменного напыления, сочетающего процессы модуляции электрической мощности плазмотрона и детонации плазменного потока за счет углеводородных добавок к плазмообразующему воздуху, что позволит сделать выводы о возможности такого совмещения и при положительном результате – разработать плазменную установку и плазмотрон.

7 Исследование и разработка плазменной установки с модулятором, питающимся от внешнего источника высокого напряжения, дающего возможность генерировать в плазменной струе более интенсивные ударные волны с получением высококачественных покрытий.

Список литературы

1 Гутман, Б. Е. Влияние модуляции плазменной дуги на адгезию и газопроницаемость порошковых покрытий. / Б. Е. Гутман, М. Х. Шоршохов // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 6. – 61-64 с.

2 Кудинов В. В., Иванов Е. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. – М., Машиностроение, 1975. – 288 с.

3 Лизунков, Т. П. Интенсификация плазменного напыления при воздействии акустических и электрических колебаний на гетерогенную струю / Т. П. Лизунков, В. Д. Шиманович, В. Д. Буров // Инженерно-физический журнал, 1965. – Т.47. – 12-16 с.

4 Ажаронок, В. В. Влияние внешнего акустического поля, на температуру плазмы дугового разряда / В. В. Ажаронок., Н. Ф. Алешин, В. А. Губкевич, Т. П. Лизунков, Н. И. Чубрик. В. Д. Шиманович // Инженерно-физический журнал, 1986. – Т.51. – М3, 481 – 486 с.

5 Пустовойтенко, А. И. К оценке влияния пульсаций параметров нагретого газа при струйной обработке порошков / А. И. Пустовойтенко, С. А. Панфилов, Ю. В. Цветков // Физика и химия обработки материалов. 1980. – 151-152 с.

6 Донской А. В., Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л. : Машиностроение, 1979. – 221 с.

7 Гонопольский, А. М. Влияние пульсаций потока плазмы на качество покрытий при напылении порошковых материалов. – В кн. : Качество и эффективность автогенного оборудования и процессов. Труды ВНИИ автогенмаш. – М. : 1981. – 33-41 с.

8 Боршоров, М. Х., Физико-механические основы детонационного напыления покрытий / М. Х. Боршоров, Ю. А. Харламов. – М. : Наука, 1987. – 234 с.

9 Минько, Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных токов. – Минск : Наука и техника. 1970. – 184 с.

10 Ranger A. A, Nichollos.A. A. Aerodynamic Shattering of Liquid Drops AIAA Joirnal v. 7, № 2. 1969. pp. 285-290.

11 Райзер, Ю. П. Физика газового разряда. – М. : Наука, 1987. – 692 с.

12 Гутман, Б. Е. Влияние модуляции плазменной дуги на некоторые параметры

технологии напыления // Сварочное производство. – 1984. – № 9 – 17-19 с.

13 Шоршоров, М. Х. Влияние модуляции плазменной дуги на структуру покрытий / М. Х. Шоршоров, Р. М. Волкова, В. П. Боженков, Б. Е. Гутман // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 6. – 65-68 с.

14 Кадырметов, А. М. Интенсификация энергообмена в гетерогенной плазменной струе при модуляции электрических параметров процесса плазменного напыления / А. М. Кадырметов // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 4. – С. 739-746.

15 А. с. 1774828 СССР, МКИ(5) H 05 B 7/18, H 05 H 1/00. Способ нанесения покрытия и устройство для его осуществления / А. П. Лукьянчук, А. М. Кадырметов, Б. А. Кайзер, Д. И. Станчев (СССР) – № 4908035 / 07 ; Заявл. 08.01.91.

16 Соснин, Н. А. Плазменные технологии : Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.

17 Левин, Э. Л. Термомеханическое упрочнение деталей при восстановлении наплавов / Э. Л. Левин, И. С. Синяговский, Г. С. Трофимов – М. : Колос, 1974 – 160 с.

18 Багмутов, В. П. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров – Новосибирск : Наука, 2003. – 318 с.

19 Сухачев, Г. А. Виброшлифование теплозащитного покрытия поверхностей детали отрасли / Г. А. Сухачев, А. В. Левченко // Технология. Технология машиностроения : Науч.-тех. сб. – М. : Машиностроение, 1991. – Вып. 3. – С. 15-18.

20 Смоленцев, В. П. Формирование поверхностей контактной и комбинированной обработкой / В. П. Смоленцев, Г. А. Сухочев, А. В. Бондарь // Третья международная научно-техническая конференция по теме : «Влияние технологии на состояние поверхностного слоя – ПС 96». – Гжов, Польша, 1996. – С. 171-181.

21 Сухочев, Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. – М. : Машиностроение, 2004. – 287 с.

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

23 Заруди, М. Е. Электрический дуговой разряд в канале: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. М., 1971. – 425.

24 Пат. 2029308 (Россия), МКИ(6) G 01 P 5 / 00. Способ определения скорости потока и устройство для его осуществления / А. М. Кадырметов, Д. И. Станчев, Ю. П. Земсков, А. П. Лукьянчук, А. В. Кузнецов ; заявитель и патентообладатель Воронеж. лесотехн. ин-т. – № 5020052 / 10 ; Заявл. 03.01.92 ; Оpubл. 20.02.95, Бюл. № 5. – 7 с.

25 Пат. 2063638 (Россия), МКИ(6) G 01 P 5 / 18. Устройство для определения скоростей двухфазного потока / А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, Д. И. Станчев, А. П. Лукьянчук ; заявитель и патентообладатель Воронеж. лесотехн. ин-т. – № 93031664 / 28 ; Заявл. 15.06.93 ; Оpubл. 10.07.96, Бюл. № 19. – 7 с.

26 Кадырметов, А. М. Исследование технологии плазменного напыления в условиях модуляции теплофизических параметров потока с применением оптической диагностики характеристик дисперсной фазы напылительной струи [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, И. П. Гуляев, А. В. Долматов, В. И. Кузьмин, Е. В. Снятков, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – № 2(16). – С. 16-23. – Режим доступа : http://vestnikvgtlta.ru/arhiv/2016/2/3_2_16_2016.pdf. – Загл. с экрана.

27 Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. Хасуи А. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.

28 Тушинский, Л. И. Методы исследований материалов : Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, А. О. Токарев, В. И. Синдеев. – М. : Мир, 2004. – 284 с.

References

- 1 Gutman, B. E. The influence of the modulation of the plasma arc on adhesion and gas permeability of powder coatings / B. E. Gutman, M. Kh. Shorshokhov // Physics and chemistry of materials processing. – 1986. – №. 6. – 61-64 p.
- 2 Kudinov V. V., Ivanov E. M. Plasma by plasma of refractory coatings. – M., Mechanical Engineering, 1975. – 288 p.
- 3 Lizunkov, T. P. The intensification of plasma spraying when exposed to acoustic and electrical vibrations on a heterogeneous stream / T. P. Lizunkov, V. D. Shimanovich, V. D. Burov // Engineering and Physical Journal, 1965. – T.47. – 12-16 s.
- 4 Azaronok, V. V. The influence of the external acoustic field ,on the temperature of the plasma of the arc discharge / V. in Azaronok., N. F. Aleshin, V. A. Gubkevich, T. P. Lizunkov, N. I. Chubrik. V. D. Shimanovich // Engineering and Physical Journal, 1986. – T.51. – M3, 481 – 486 p.
- 5 Pustovoitenko, A. I. To the assessment of the influence of pulsations of the parameters of heated gas during jet processing of powders / A. I. Pustovoenko, S. A. Panfilov, Yu. V. Tsvetkov // Physics and chemistry of materials processing. 1980. – 151-152 p.
- 6 Donskoy A. V., Kolognikin V. S. Electric plasma processes and installations in mechanical engineering. – L. : Mechanical Engineering, 1979. – 221 p.
- 7 Gonopolsky, A. M. The influence of pulsations of plasma flow on the quality of coatings during spraying powder materials. – In the book : The quality and effectiveness of autogenic equipment and processes. Proceedings of VNII AvtoGenmash. – M. : 1981. – 33-41 p.
- 8 Borshorov, M. Kh., Physico-mechanical foundations of detonation spraying of coatings / M. Kh. Borshorov, Yu. A. Kharlamov. – M. : Nauka, 1987. – 234 p.
- 9 Minko, L. Ya. Receiving and studying pulsed plasma currents. – Minsk : Science and technology. 1970. – 184 p.
- 10 Ranger A. A., Nichollos. A. A. Aerodynamic Shattering of Liquid Drops Aiaa Joinal V.7, № 2. 1969. Pp. 285-290.
- 11 Raiser, Yu. P. Physics of the gas discharge. – M. : Nauka, 1987 – 692 p.
- 12 Gutman, B. E. The influence of the modulation of the plasma arc on some parameters of the stirring technology // welding production. – 1984. – № – 9 – 17-19 p.
- 13 Shorshorov, M. Kh. The influence of the modulation of the plasma arc on the structure of coatings / M. H. Shorshorov, R. M. Volkova, V. P. Bozhenov, B. E. Gutman // Physics and chemistry of materials processing. – 1987. – №. 6. – 65-68 p.
- 14 Kadyrmetov, A. M. The intensification of energy exchange in the heterogeneous plasma stream during the modulation of the electrical parameters of the plasma spraying process / A. M. Kadirmetov // Engineering and Physical Journal. – 2013. – T. 86. – №. 4. – S. 739-746.
- 15 A. p. 1774828 USSR, MKI (5) H 05 B 7 / 18, H 05 H 1 / 00. The method of applying the coating and the device for its implementation / A. P. Lukyanchuk, A. M. Kadirmetov, B. A. Kaiser, D. I. Stanchev (USSR) – № 4908035 / 07 ; Declared. 08.08.91.
- 16 Sosnin, N. A. Plasma technologies : Guide for engineers / N. A. Sosnin, S. A. Ermakov, P. A. Topolyansky. – St. Petersburg: Publishing House Polytechnic. University, 2008. – 406 p.
- 17 Levin, E. L. Thermomechanical strengthening of the details when restoring surfaces / E. L. Levin, I. S. Sinyagovsky, G. S. Trofimov – M. : Kolos, 1974 – 160 p.
- 18 Bagmuts, V. P. Electromechanical processing: technological and physical foundations, properties, implementation / V. P. Bagmutov, S. N. Parshev, N. G. Dudkin, I. N. Zakharov. – Novosibirsk : Science, 2003. – 318 p.
- 19 Sukhachev, G. A. Vibration grinding of the heat-protective coating of the surfaces of the part of the industry / G. A. Sukhachev, A. V. Levchenko // Technology. Engineering Technology : Scientific and Technology. Sat. – M. : Mechanical Engineering, 1991. – Issue. 3. – S. 15-18.
- 20 Smolentsev, V. P. Formation of surfaces of contact and combined processing / V. P. Smolentsev, G. A. Sukhochev, A. V. Bondar // Third International Scientific and Technical

Conference on the topic : “The influence of technology on the state of the surface layer – PS 96 ”. – GZHOV, Poland, 1996. – S. 171-181.

21 Sukhochev, G. A. Management of the quality of products working in extreme conditions under non-stationary influences. – М. : Engineering, 2004. – 287 p.

22 Kadirmetov, A. M. Equipment for plasma application and hardening of coatings with modulation of electrical parameters / A. M. Kadirmetov, D. I. Stanshev, G. A. Sukhochev // strengthening technologies and coating. – 2010. – № 11 (71). – S. 41-48.

23 Zarodi, M. E. Electric arc discharge in the channel: Author of Dis ... Dr. Techno. sciences. М., 1971. – 425.

24 PAT. 2029308 (Russia), MKI (6) G 01 P 5 / 00. A way to determine the flow rate and the device for its implementation / A. M. Kadirmetov, D. I. Stanshev, Yu. P. Zemskov, A. P. Lukyanchuk, A. V. Kuznetsov ; The applicant and patent holder of the Vorozh. Forestry. Inst. – № 5020052 / 10 ; Declared. 03/03/92 ; Publ. 02.20.95, Bul. № 5. – 7 p.

25 Pat. 2063638 (Russia), MKI (6) G 01 P 5 / 18. A device for determining the speeds of a two phase flow / A. M. Kadirmetov, V. I. Smotyev, D. I. Stanchev, A. P. Lukyanchuk ; The applicant and patent holder Voronezh. Forestry. Inst. – № 93031664 / 28 ; Declared. 06.15.93 ; Publ. 07.10.96, Bul. № 19. – 7 p.

26 Kadirmetov, A. M. Study of plasma spraying technology in conditions of modulation of thermophysical flow parameters using the optical diagnosis of the characteristics of the dispersed phase of the pump [Electronic resource] / A. M. Kadirmetov, I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov, in . I. Kuzmin, E. V. Venatkov, A. S. Pustovalov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2016. – № 2 (16). – S. 16-23. – Access mode: http://vestnikvglta.ru/arhiv/2016/2/3_2_16_2016.pdf.

27 Khasui A., Morigaki O. surfacing and spraying. Khasui A. – М. : Mechanical Engineering, 1985. – 240 p.

28 Tushinsky, L. I. Methods of research of materials: structure, properties and processes of applying inorganic coatings / L. I. Tushinsky, A. V. Kloorov, A. O. Tokarev, V. I. Sineev. – М. : Mir, 2004. – 284 p.

© Кадырметов А.М., Снятков Е.В., Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., Буренко Н.С., 2022