УДК 630*332.2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ФОРМИРОВАНИЮ ПЛОЩАДОК-УГЛУБЛЕНИЙ ВОКРУГ ПНЕЙ ГИБКИМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ПЛОЩАДКОДЕЛАТЕЛЯ

Е. В. Поздняков, А. К. Поздняков
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»
E-mail: pozd.ev@yandex.ru

С целью снижения износа режущих элементов машин для дробления и измельчения пней, возникающего в результате их взаимодействия с частицами почвы при понижении пней ниже поверхности земли [1, 2, 3, 4, 5], была разработана конструкция площадкоделателя с гибкими рабочими органами, предназначенного для формирования площадок-углублений вокруг пней [6, 7, 8]. Для проверки эффективности применения разработанной машины была создана имитационная модель ее технологического процесса и составлена компьютерная программа «Программа для моделирования процесса очистки пня площадкоделателем» [9].

Анализ разработанной модели проводился на основе множества компьютерных экспериментов с различными значениями входных параметров, которые включали в себя четыре группы факторов, влияющих на технологический процесс площадкоделателя: «Параметры площадкоделателя», «Кинематические параметры», «Параметры почвы», «Параметры пня».

Параметры площадкоделателя (рис. 1): L_T – длина рабочей части гибких рабочих органов (тросов); B_P – расстояние между осями роторов; N_C – количество секций в роторе; N_T – количество тросов в секции; B_C – расстояние между секциями; c_u – жесткость троса на изгиб.

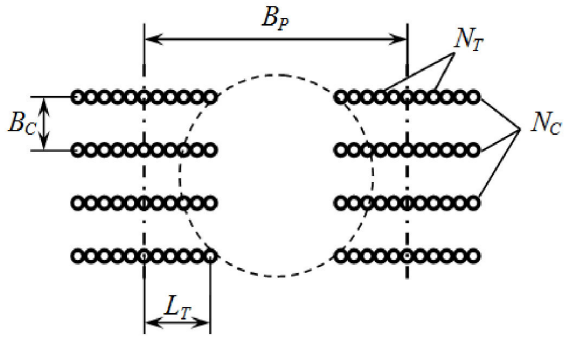

Рисунок 1 – Геометрические характеристики площадкоделателя с гибкими рабочими органами

Кинематические параметры: n_p – частота вращения роторов; n_{pm} – частота вращения ротатора; α_p – угол наклона к вертикальной плоскости; β_p – угол наклона к горизонтальной плоскости.

Параметры почвы: $c_П$ – коэффициент упругости; $d_П$ – внутреннее трение; $k_{св}$ – коэффициент связности.

Параметры пня (рис. 2): $S_П$ – сбег пня, см/м; $D_В$ – диаметр вершины пня; $h_П$ – высота пня; $h_{ПЛ}$ – глуби33на площадки-углубления.

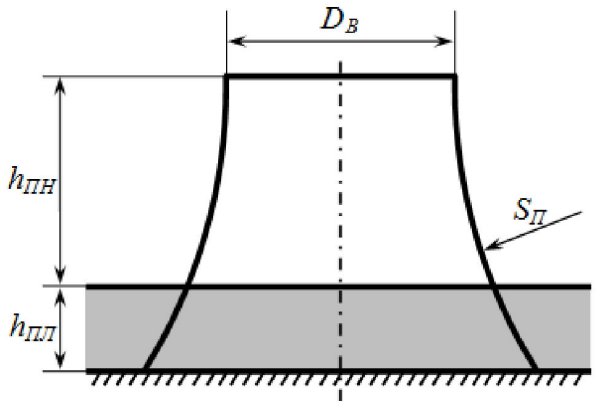

Рисунок 2 – Геометрические характеристики пня

Выходные параметры («Показатели эффективности технологического процесса площадкоделателя») являются искомыми в процессе моделирования и включают в себя: P – полноту очистки боковой поверхности пня (процент очищенной поверхности); F_O – среднее усилие очистки; N – потребляемую мощность, расходуемую на очистку пня и формирование вокруг него площадки-углубления [10].

Каждый компьютерный эксперимент проводился следующим образом. При запуске программы сначала производилась засыпка пня почвой: 2000 элементов почвы в случайных позициях (использовался генератор случайных чисел с равномерным законом распределения) появлялись в объеме куба, в котором осуществлялось моделирование. Затем в течение двух секунд производился просчет механического движения элементов почвы, в процессе которого они оседали под действием силы тяжести и формировали вблизи пня случайное уплотнение. После формирования почвы, в момент времени t = 2 с, в модели появлялись вращающиеся гибкие рабочие органы, которые вступали во взаимодействие с элементами почвы и боковой поверхностью пня.

В результате вращения ротатора и роторов с тросами производилось удаление почвы вокруг пня, тем самым постепенно формировалась площадка-

углубление. При этом в программе определялись следы движения тросов по поверхности пня, и строились картограммы ее очистки (рис. 3).

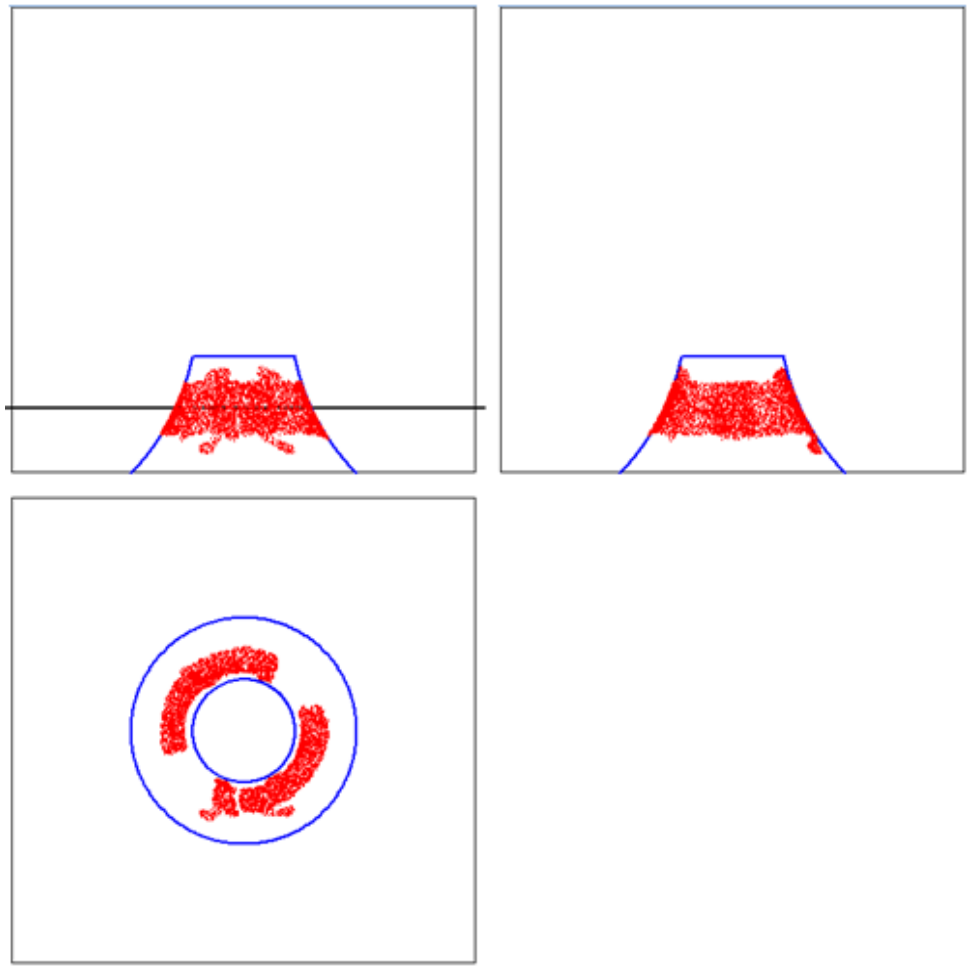

Рисунок 3 – Три проекции (вид спереди, сбоку и сверху) картограммы очистки боковой поверхности пня гибкими рабочими органами площадкоделателя

По картограммам программа рассчитывала показатель полноты очистки боковой поверхности пня *P*, то есть долю боковой поверхности, которая контактировала с тросами от верхней части до прикоренной области пня (области, с которой впоследствии возможен контакт рабочих органов для измельчения и дробления пней). По мере вращения роторов и ротатора полнота очистки увеличивалась и достигала определенного значения (рис. 4). В случае если расстояние между роторами не соответствует диаметру пня, полнота обработки не достигает 100 % (лишь около 67 %, рис. 4): остаются неочищенные полосы вблизи верхней и прикоренной частей пня.

Частот вращения роторов 200-300 мин$^{-1}$ и ротатора 10-15 мин$^{-1}$ достаточно, чтобы длительность обработки составляла примерно 10 с: график *P*(*t*) выхо-

дит на насыщение при t = 7,5 с. Поэтому в момент времени t = 10 с производилась остановка интегрирования уравнений движения тросов и элементов почвы. После этого осуществлялся расчет показателей эффективности технологического процесса площадкоделателя: за время работы устройства усреднялось усилие очистки F_O, а также определялись окончательные значения потребляемой мощности N и полноты очистки боковой поверхности пня P.

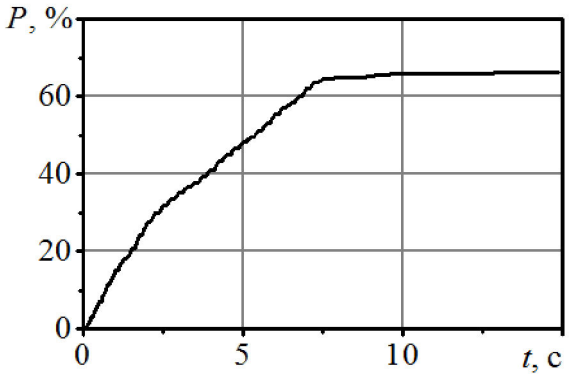

Рисунок 4 – Зависимость полноты очистки боковой поверхности пня от времени

Полнота очистки определяется по формуле

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N_Д} \begin{cases} 1, \begin{cases} z_{кн} \le z_{Дi} \le z_{кв}; \\ \left| L_К - \sqrt{S_П^2 - \left(h_П + h_{ПЛ} - z_{Дi}\right)^2} - \sqrt{x_{Дi}^2 + y_{Дi}^2} \right| < \varepsilon; \\ j - \text{элемент троса}; \\ \left(\sqrt{\left(x_{Дi} - x_j\right)^2 + \left(y_{Дi} - y_j\right)^2 + \left(z_{Дi} - z_j\right)^2} < \dfrac{d_j}{2} \right)_{\forall j \forall \tau}; \end{cases} \\ 0, \text{в противном случае}; \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_Д} \begin{cases} 1, \begin{cases} z_{кн} \le z_{Дi} \le z_{кв}; \\ \left| L_К - \sqrt{S_П^2 - \left(h_П + h_{ПЛ} - z_{Дi}\right)^2} - \sqrt{x_{Дi}^2 + y_{Дi}^2} \right| < \varepsilon; \end{cases} \\ 0, \text{в противном случае}; \end{cases}}, \quad (1)$$

где i – номер элементарных кубов, на которые дискретизируется контрольная область; $N_Д$ – количество элементарных кубов; $z_{кн}$ и $z_{кв}$ – уровни, задающие верхнюю и нижнюю границы кольца вокруг пня, в котором производится контроль полноты очистки; $x_{Дi}$, $y_{Дi}$, $z_{Дi}$ – координаты элементарных кубов; $L_К$ – расстояние в горизон-

тальном направлении от оси пня до проекции на ось OX центра кривизны боковых поверхностей пня; $S_П$ – сбег пня; $h_П$ – высота пня; $h_{ПЛ}$ – глубина площадки-углубления; ε – критерий, определяющий принадлежность элементарного куба к боковой поверхности пня; j – номер элемента троса; x_j, y_j, z_j – декартовы координаты элемента троса; d_j – диаметр элемента троса; τ – порядковый номер шага интегрирования дифференциальных уравнений движения по времени.

Среднее усилие очистки может быть определено из соотношения

$$F_O = \frac{\sum_{\tau=1}^{[t_{КЭ}/\Delta t]} \sum_{i=1}^{N_Э} \begin{cases} \sqrt{\left(F^x_{i-П}\right)^2 + \left(F^y_{i-П}\right)^2 + \left(F^z_{i-П}\right)^2}, \begin{cases} i - элемент\ троса; \\ z_{кн} \le z_i \le z_{кв}; \\ \left| L_K - \sqrt{S_П^2 - \left(h_П + h_{ПЛ} - z_i\right)^2} + d_i - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \right| < \varepsilon; \end{cases} \\ 0, в\ противном\ случае; \end{cases}}{\sum_{\tau=1}^{[t_{КЭ}/\Delta t]} \sum_{i=1}^{N_Э} \begin{cases} 1, \begin{cases} i - элемент\ троса; \\ z_{кн} \le z_i \le z_{кв}; \\ \left| L_K - \sqrt{S_П^2 - \left(h_П + h_{ПЛ} - z_i\right)^2} + d_i - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \right| < \varepsilon; \end{cases} \\ 0, в\ противном\ случае; \end{cases}}, \quad (2)$$

где τ – порядковый номер шага интегрирования дифференциальных уравнений движения по времени; $t_{КЭ}$ – продолжительность компьютерного эксперимента; Δt – величина шага интегрирования дифференциальных уравнений движения по времени; [...] – операция выделения целой части числа; i – номер элемента троса; $N_Э$ – количество элементов троса; $F^x_{i-П}$, $F^y_{i-П}$, $F^z_{i-П}$ – компоненты вектора силы взаимодействия элемента троса с поверхностью пня; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты элемента троса; d_i – диаметр элемента троса.

Мощность, расходуемая на взаимодействие тросов с почвой и поверхностью пня, рассчитывается по формуле

$$N = \frac{\sum_{\tau=1}^{[t_{КЭ}/\Delta t]} \sum_{i=1}^{N_Э} \begin{cases} \vec{v}_i \cdot \left(\vec{F}_{i-П} + \sum_{j=1}^{N_A} \begin{cases} \vec{F}_{ij}, j - элемент\ почвы; \\ 0, в\ противном\ случае \end{cases} \right), i - элемент\ троса; \\ 0, в\ противном\ случае; \end{cases}}{\left[t_{КЭ}/\Delta t\right]}, \quad (3)$$

где i – номер элемента троса; $\vec{v}_i$ – скорость i-го элемента троса на текущем шаге

интегрирования τ; $\vec{F}_{i-П}$ – сила взаимодействия i-го элемента троса с поверхностью пня; j – номер элемента почвы; N_A – количество элементов почвы, контактирующих с i-м элементом троса; $\vec{F}_{ij}$ – сила взаимодействия i-го элемента троса с j-м элементом почвы.

Знаком "·" обозначается скалярное произведение векторов [10].

Таким образом, разработан компьютерный эксперимент, позволяющий смоделировать технологический процесс площадкоделателя для формирования площадок-углублений вокруг пней. При проведении дальнейших исследований для выявления закономерностей изменения показателей эффективности работы машины необходимо поочередно изменять ее основные конструктивные и технологические параметры.

Библиографический список

1 Сухов, И. В. Технологии лесокультурных работ на вырубках (рекомендации) [Текст] / И. В. Сухов, В. А. Кострикин, В. И. Казаков. – М. : ВНИИЛМ, 2004. – 152 с.

2 Ткачев, В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин [Текст] / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1971. – 264 с.

3 Винокуров, В. Н. Исследование, разработка и внедрение в производство самозатачивающихся рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий [Текст] : монография / В. Н. Винокуров. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 311 с.

4 Бартенев, И. М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст] / И. М. Бартенев, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3 (11). – С. 114-123.

5 Перспективные направления технологии и механизации лесозаготовительных и лесохозяйственных работ [Текст] : учебное пособие / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, В. И. Казаков и [др.]. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – 132 с.

6 Бартенев, И. М. Площадкоделатель вокруг пней [Текст] / И. М. Бартенев, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2014. – № 1 (13). – С. 156-158.

7 Бартенев, И. М. Эффективные способы и технические средства удаления пней [Текст] / И. М. Бартенев, Е. В. Поздняков // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 9. – С. 13-16.

8 Бартенев, И. М. Энергосберегающие и природосберегающие техноло-

гии в лесном комплексе [Текст] : учебное пособие / И. М. Бартенев. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – 107 с.

9 Бартенев, И. М. Математическая модель площадкоделателя для формирования площадок-углублений вокруг пней [Текст] / И. М. Бартенев, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2014. – № 4 (16). – С. 147-156.

10 Поздняков, Е. В. Определение показателей эффективности технологического процесса площадкоделателя для формирования площадок-углублений вокруг пней [Текст] / Е. В. Поздняков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 5-1 (16-1). – С. 270-275.

УДК 621.793.74

ОБЗОР ВОПРОСОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, А. С. Пустовалов
ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический
университет им. Г. Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия
E-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Нанесение покрытий на детали машин обеспечивает создание необходи-мых функциональных поверхностных свойств стойкости деталей к износным и другим механическим и термическим воздействиям, коррозии и т. п. К прогрессивным способам нанесения функциональных покрытий в силу многих достоинств относят плазменное напыление [1]. Однако плазменное напыление имеет недостатки, к числу которых относится низкий общий энергетический КПД процесса напыления, составляющий для порошковых материалов 3-5 % [2, 3]. Повышение энергетического КПД плазменного напыления является одной из главных актуальных проблем данной технологии. Решение её базируется на знании физических процессов плазменного напыления и влиянии на него всего множества факторов, которое по мнению некоторых исследователей составляет 20-60 и более факторов [4].

Знание физических процессов, происходящих при плазменном напылении, прежде всего определяется вышеуказанными факторами, влияющими на критерии процесса напыления, и схемой этих влияний.

Факторы и критерии плазменного напыления, определяющие его эффективность

Все основные управляемые факторы процесса могут быть условно разделены на несколько групп:

1 Способы плазменного напыления: напыление плазмотронами с косвенной дугой, с дополнительной выносной дугой, с модуляцией параметров, сверхзвуковыми плазмотронами, плазменной напыление в разреженной или контролируемой атмосфере и др.

2 Конструктивные параметры плазменного распылителя: схемные, геометрические, физико-механические параметры материалов деталей плазмотрона; условия ввода напыляемого материала (схематические по месту ввода: до анодного пятна, после анодного пятна, под срез плазмотрона; схематические по количеству вводов: один, два, три; геометрические).

3 Параметры, характеризующие режим работы плазменного распылителя:

мощность дуг плазмотрона (средняя, импульсная); параметры относительного перемещения плазмотрона и детали (скорости, подача), расходы плазмообразующего, транспортирующего, защитного газов и присадок, расход напыляемого материала покрытия, дистанция напыления, частота, скважность и длительность модулируемых импульсов мощности дуг.

4 Параметры напыляемого материала (физико-химические параметры напыляемого материала покрытия, включая форма частиц и гранулометрический состав порошков).

5 Параметры плазменной струи (скорость, температура, давление и химический состав, их распределение по продольной и поперечной координатам) и потока напыляемых частиц (скорость, температура, размеры частиц и их распределение по продольной и поперечной координатам). Параметры данной группы являются зависимыми и определяемыми параметрами 2-4 групп факторов.

6 Параметры, характеризующие внешние условия напыления (среда: давление, состав разреженной или контролируемой атмосферы).

7 В качестве критериев процесса используются показатели качества покрытий (адгезионная и когезионная прочность, плотность, пористость, шероховатость, равномерность по толщине, уровень остаточных напряжений, однородность состава, микро- и макроструктуры) [2] и интегрированные показатели эффективности технологического процесса (коэффициенты использования материала (КИМ), энергии (КИЭ), полезного действия процесса (КПД), комплексный критерий) [5, 6]. Поэтапная технологическая схема влияния факторов на критерии процесса представлена на рисунке 1.

Схема, представленная на рисунке 1, показывает структурно-следственное влияние исходных факторов на критерии процессов через выходные параметры 1-го этапа, непосредственно влияющие на процесс формирования покрытия, и выходные параметры 2-го этапа, непосредственно влияющие на качество упрочнения покрытия. Анализ этих данных указывает на то, что процесс формирования покрытия (2 этап) определяется скоростями и температурами струи и частиц, энтальпией струи, структурой, химическим и гранулометрическим составом частиц и их концентрацией в потоке. Изучение свойств покрытий и влияния параметров 1-го и 2-го этапов на их качество дает возможность находить пути совершенствования плазменного нанесения и упрочнения покрытий и методы управления ими. Однако влияние всего множества факторов на критерии процесса носит конкурирующий характер.

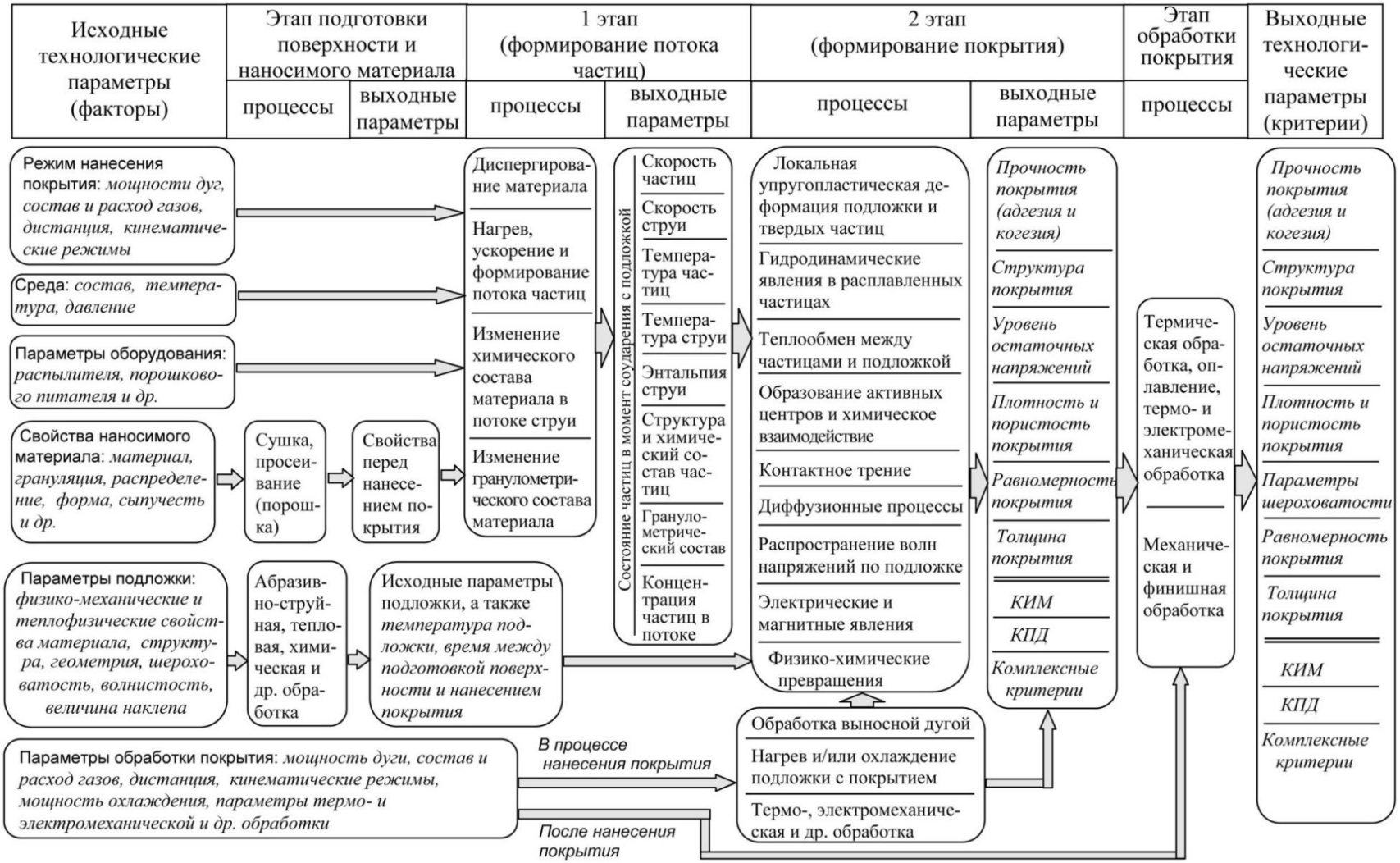

Рисунок 1 – Схема структурно-следственной связи факторов и критериев технологического процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий

Анализ влияния факторов на эффективность плазменного напыления

Исходные факторы, определяющие эффективность плазменного напыления, реализуются при проектировании технологического процесса плазменного напыления. Ими являются факторы первой группы, характеризующие способы плазменного напыления. Базовыми способами среди них являются способы напыления с использованием плазмотронов с косвенной дугой (плазмотронами с самоустанавливающейся дугой, с анодным уступом, с межэлектродными вставками) в открытой атмосфере. Некоторые основные влияния факторов 2-6 групп для базовых способов имеют вид, качественно представленный на рисунках 2, 3.

Группа конструктивных факторов (группа 2)

Для плазмотронов базовой схемы данная группа факторов имеет непосредственное влияние на тепловой КПД плазмотрона η_m, который зависит в данном случае от системы охлаждения плазмотрона, наличия системы и параметров рекуперации тепла, газодинамических характеристик плазмотрона, наличия и параметров насадков на анодной части.

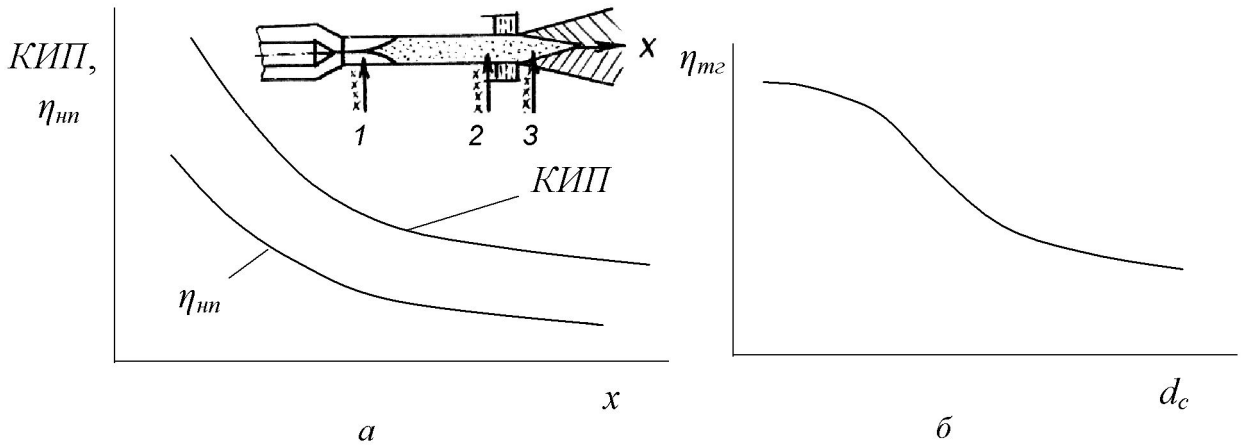

Рисунок 2 – Влияние места ввода порошка (продольной координаты x) на *КИП* и эффективный КПД нагрева порошка $\eta_{нп}$ (*а*) и влияние диаметра сопла d_c плазмотрона на тепловой КПД нагрева газа $\eta_{тг}$ (*б*)

Традиционное водяное охлаждение плазмотрона недостаточно эффективно, и для наиболее совершенных плазмотронов базовой схемы их тепловой КПД равен 0,7-0,75. Эффективная рекуперация тепла возможна для пароводяных плазмотронов, в которых вода, проходя через рубашку охлаждения плазмотрона, подается в плазмообразующий канал. Для маломощных плазмотронов возможно частичное охлаждение плазмообразующим газом, который также после прохождения рубашки охлаждения подается в плазмообразующий канал

плазмотрона. Возможно охлаждение деталей плазмообразующего канала плазмотрона созданием на их поверхности газовых, паро- и парогазоводяных защитных завес. Эффективным вариантом охлаждения с рекуперацией тепла является использование пористых материалов деталей плазмообразующего канала плазмотрона. Однако данный способ имеет недостаток в изготовлении таких вставок, обеспечивающих заданное гидравлическое сопротивление и, соответственно, расход охладителя. Кроме того, поверхности таких вставок в процессе запусков и работы плазмотрона постепенно заплавляются, что приводит к нарушению охлаждения и работы плазмотрона.

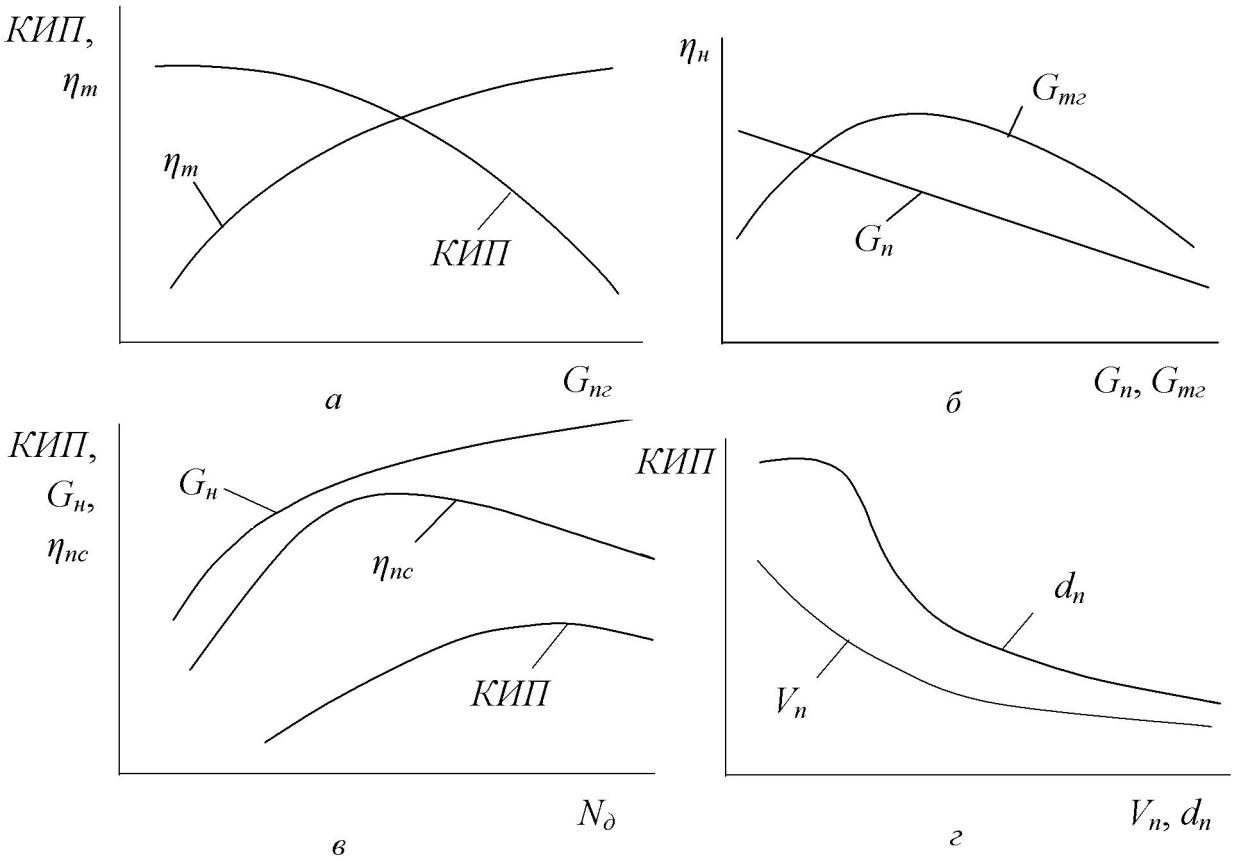

Рисунок 3 – Влияние расхода плазмообразующего газа $G_{пг}$ (*а*), расхода порошка $G_п$ и транспортирующего газа $G_{mг}$ (*б*), мощности дуги $N_д$ (*в*), скорости ввода порошка в струю $V_п$ и размера частиц порошка $d_п$ (*г*) на энергетический КПД плазменного напыления $\eta_н$, *КИП*, тепловой КПД плазмотрона η_m, производительность напыления $G_н$, КПД использования энергии струи $\eta_{пс}$

Традиционное водяное охлаждение плазмотрона недостаточно эффективно, и для наиболее совершенных плазмотронов базовой схемы их тепловой КПД равен 0,7-0,75. Эффективная рекуперация тепла возможна для пароводяных плазмотронов, в которых вода, проходя через рубашку охлаждения плаз-

мотрона, подается в плазмообразующий канал. Для маломощных плазмотронов возможно частичное охлаждение плазмообразующим газом, который также после прохождения рубашки охлаждения подается в плазмообразующий канал плазмотрона. Возможно охлаждение деталей плазмообразующего канала плазмотрона созданием на их поверхности газовых, паро- и парогазоводяных защитных завес. Эффективным вариантом охлаждения с рекуперацией тепла является использование пористых материалов деталей плазмообразующего канала плазмотрона. Однако данный способ имеет недостаток в изготовлении таких вставок, обеспечивающих заданное гидравлическое сопротивление и, соответственно, расход охладителя. Кроме того, поверхности таких вставок в процессе запусков и работы плазмотрона постепенно заплавляются, что приводит к нарушению охлаждения и работы плазмотрона.

Газодинамические характеристики плазмотронов определяются профилем плазмообразующего канала, который, в свою очередь, обеспечивает скорость плазменной струи (дозвуковую или сверхзвуковую), степень её турбулентности, равномерность распределения продольного и поперечного профиля. Сверхзвуковые плазмотроны обеспечивают наилучшее качество покрытий [10, 11], что обусловлено повышением скорости напыляемых частиц в 6-8 и более раз в сравнении с традиционным напылением. Использование сверхзвуковых плазмотронов ограничивается возможностью доступности к напыляемой поверхности и/или невозможностью напыления на внутренние малогабаритные поверхности вследствие относительно большой длины плазменной струи.

Турбулизация плазменной струи с одной стороны уменьшает её скорость, а с другой, увеличивает интенсивность передачи энергии напыляемым частицам. Это может служить удобным регулятором качества покрытия с помощью, например, модуляции параметров плазменного напыления [5, 12]. В мировой практике сверхзвуковые плазмотроны используются в установках «Киев-7» (ИЭС им. Е. О. Патона, Украина), «ТОПАС» (институт газа им. И. Н. Карпа, НПО ТОПАС, Украина), МЕТКО (Швейцария, Германия), Плазматехник (Швейцария), «Plazjet-ll-200» (Praxair Technology Incorporated, США) и др.

Насадки на анодную часть плазмотрона дают возможность повысить эффективность плазменного напыления за счет оптимизации параметров плазменного потока, защиты струи и напыляемых частиц от химического и газодинамического воздействия на плазменную струю окружающим воздухом [13]. Использование насадков позволяет повышать КИМ с 15 % до 70 % и общий

энергетический КПД плазменного напыления, несмотря на снижение теплового КПД плазмотрона [11]. Недостатком применения насадков является необходимость использования защитных периферийных потоков газов с расходами, превышающими расход плазмообразующего газа в 5-8 раз. Другим недостатком является усложнение конструкции плазмотрона.

Среди конструктивных параметров плазмотрона наиболее существенное влияние на эффективность плазменного напыления оказывает диаметр d_c и длина l_c сопла, а также место и параметры ввода порошка в плазменный поток. Диаметр сопла необходимо выбирать из условия компромисса между тепловым КПД нагрева газа $\eta_{mг}$ и тепловым КПД плазмотрона η_m (при уменьшении диаметра d_c КПД $\eta_{mг}$ возрастает, а КПД η_m падает) [7] (рис. 2, *б*). Зависимость теплового КПД плазмотрона η_m от длины сопла l_c носит экстремальный характер с максимумом. Длина сопла l_c определяется длиной дуги $l_д$, она должна выбираться минимальной при условии $l_c \geq l_д$. При увеличении длины $l_д$ до какого-то определенного значения коэффициент η_m возрастает вследствие увеличения теплопередачи плазмообразующему газу от дуги, а затем дальнейшее увеличение длины дуги приводит к передаче большей части тепла стенке канала сопла, что уменьшает КПД η_m.

Место ввода порошка в плазменный поток может быть осуществлено в области до анодного пятна, после него в канале плазматрона и на выходе из сопла, под срез сопла (рис. 2, *а*). Наиболее эффективна осевая подача распыляемого материала, так как она обеспечивает получение компактного потока напыляемых частиц с высокими значениями скорости и температуры [2]. Однако, конструктивно такая схема сложна. Поэтому применяют радиальную подачу. Наиболее высокие значения *КИМ* и КПД нагрева порошка $\eta_{нп}$ достигаются при введении его в доанодную зону плазмотрона.

Группа режимных факторов (группа 3)

Основные влияния режимных факторов представлены на рисунке 3. К ним относятся влияния мощности дуги и расходов плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов, расход напыляемого материла. Из рисунка 3, *а* видно, что зависимость общего энергетического КПД плазменного напыления от расхода плазмообразующего газа $G_{пг}$ имеет экстремальный характер с максимумом [2, 7]. Это обусловлено конкурирующим влиянием расхода $G_{пг}$ на *КИП* и на тепловой КПД плазмотрона η_m – при увеличении расхода $G_{пг}$ коэффицент η_m растет, а КИП падает.

Зависимость общего КПД плазменного напыления $\eta_н$ от расхода транспортирующего газа $G_{тг}$ также имеет характер кривой с максимумом [8] (рис. 3, *б*). Это обусловлено конкурирующими механизмами теплопередачи. С одной стороны, при увеличении расхода $G_{тг}$ увеличиваются тепловые потери в транспортирующий газ, что приводит к захолаживанию плазменной струи и к снижению доли тепла, передаваемого напыляемым частицам. С другой стороны, при радиальной подаче напыляемого материала и незначительных расходах $G_{тг}$ частицы напыляемого материала не попадают в высокотемпературную приосевую область плазменной струи, что снижает энергопередачу им энергии от плазменной струи.

По данным работы [8] зависимость общего КПД плазменного напыления $\eta_н$ от расхода напыляемого материла $G_п$ носит убывающий характер. Увеличение расхода порошка приводит к захолаживанию плазменной струи. Это приводит к уменьшению температуры и скорости частиц в плазменной струе, к снижению параметров эффективности процесса и к снижению качества покрытия [2]. Однако это справедливо при значениях расхода $G_п$, больших какого-то определенного оптимального значения, так как, например, при мизерных расходах доля энергии, передаваемая частицам также будет мизерна, что будет соответствовать мизерному КПД процесса $\eta_н$. Увеличение расхода транспортирущего газа $G_{тг}$ приводит к увеличению скорости ввода порошка в плазменный поток $V_п$, что, в свою очередь, приводит к снижению КИП вследствие захолаживания плазменного потока [2] (рис. 3, *г*).

Увеличение мощности дуги плазмотрона $N_д$ позволяет повышать производительность напыления $G_н$ [2], однако при этом существуют оптимальные величины $N_д$, при которых *КИП* и коэффициент использования энергии плазменной струи $\eta_{пс}$ будут иметь максимумы [2, 9] (рис. 3, *в*). Основной вероятной причиной этого является увеличение передачи тепла от дуги электродам и, через них, охлаждающей среде, что вызывает снижение теплового КПД плазмотрона.

Группа факторов напыляемого материала (группа 4)

Относительно управляемым фактором в данной группе при использовании порошков является размер напыляемых частиц. Остальные факторы (физико-химические параметры напыляемого материала покрытия, форма частиц, состав порошков) для потребителей технологии плазменного напыления выбираются из имеющихся материалов на рынке. Влияние размера частиц $d_п$ на КИП представлено на рис. 3, *г* [2]. С увеличением размера $d_п$ возрастает необходимое

количество тепла для расплавления частиц, и при одних и тех же режимах напыления увеличивается доля непроплавленных частиц. Для мелких частиц, наоборот, возможно проплавление, перегрев и испарение частиц.

Группа факторов, характеризующих параметры плазменной струи (группа 5), полностью определяются факторами других групп. Факторы внешней среды (группа 6) имеют существенное значение для напыления в контролируемой атмосфере и в динамическом вакууме и в данном обзоре не рассматриваются.

Вследствие конкурентного характера влияния на процесс плазменного напыления рассмотренных факторов актуальная задача его оптимизации является достаточно сложной. Это объясняется недостаточно развитой теорией процесса, включающего в себя электрические, газодинамические, физико-механические, тепловые процессы, поэтому, несмотря на развитие методов математического моделирования, до сих пор основным источником информации о процессах плазменного напыления является эксперимент.

Возможности совершенствования процесса плазменного напыления

Как было отмечено выше, совершенствование плазменного напыления достигается реализацией сверхзвуковых плазменных струй [10, 11], использованием насадков на анодную часть плазмотрона [13], модуляцией параметров [12, 14, 15], созданием плазмотронов с осевой подачей напыляемого материала, добавлением присадок в плазмообразующий газ [10, 11]. Отдельным направлением совершенствования плазменного напыления, не рассмотренным в данном обзоре, является использование двух- и трехдуговых плазмотронов с разными или общим анодом, двух- и трехмодульные плазмотроны с общей камерой, позволяющие осуществлять подачу напыляемого материала и присадок в виде суспензий по осевой схеме (вдоль осевой области плазменного потока). Примером такого плазмотрона является плазмотрон Axial-III канадской фирмы Thermico. Конечным результатом реализации рассмотренных способов является, во-первых, повышение энергетического состояния напыляемых частиц в момент удара о подложку (повышение скорости и обеспечение заданной температуры), приводящее к получению высокого качества покрытий, и, во-вторых, повышение КИМ и общего КПД процесса за счет уменьшения энергетических потерь и повышения степени энергопередачи напыляемым частицам.

Примером совершенствования плазменного напыления является динамизация его электрических параметров. Физическая модель такого варианта плазменного напыления в виде схемы представлена на рисунке 4 [14].

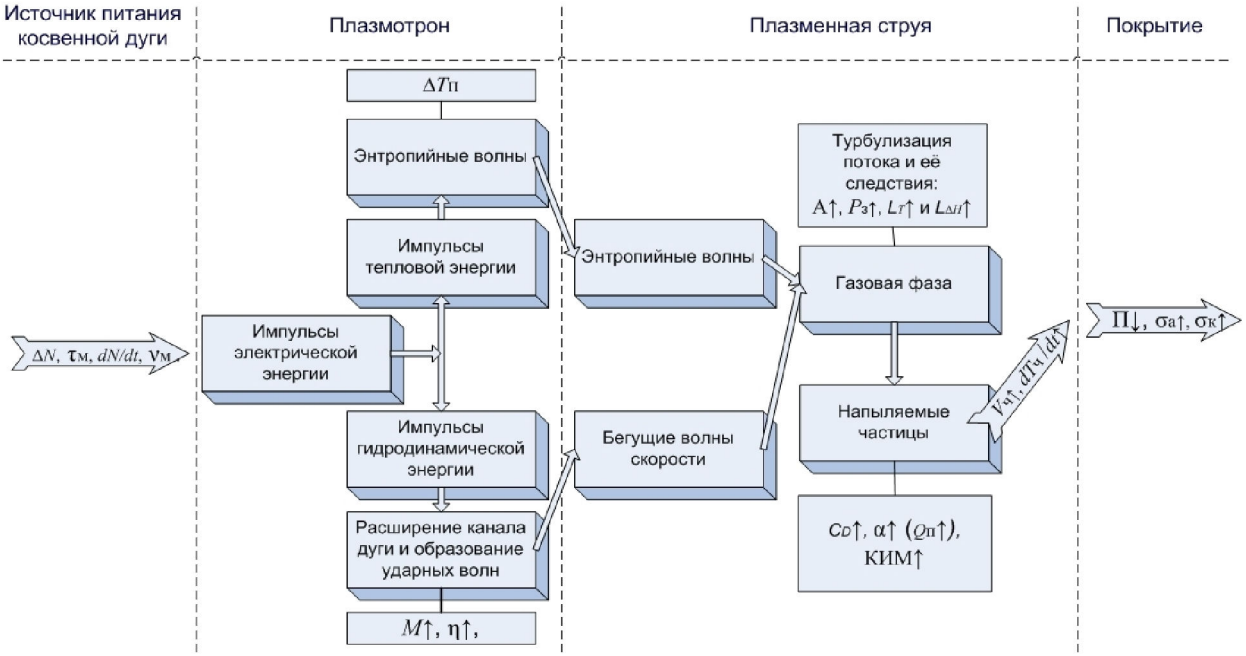

Рисунок 4 – Схема физической модели процессов плазменного напыления при модуляции электрических параметров косвенной дуги плазмотрона

Данная физическая модель основывается на преобразовании электрической энергии импульсов при модуляции в тепловую и газодинамическую энергии, изменяющих параметры плазменной струи, энергию напыляемых частиц и КПД процесса в целом. Физические процессы в плазменной струе при модуляции мощности косвенной дуги плазмотрона определяются частотой модуляции $\nu_м$ и параметрами импульсов: длительностью $\tau_м$, амплитудой ΔN и крутизной мощности dN/dt. Эти физические процессы заключаются в следующем: во-первых, в образовании энтропийных и ударных волн в плазменной струе, её турбулизации, повышении равномерности поперечного профиля A и дальнобойности по температуре L_T и энтальпии $L_{\Delta H}$, во-вторых, – в увеличении коэффициентов аэродинамического сопротивления частиц C_D и теплопередачи к ним α от плазменной струи, что вызывает рост коэффициента использования порошка *КИМ* и теплового КПД плазмотрона η, и, в третьих, – в повышении скорости частиц $V_ч$ и скорости их нагрева $dT_ч/dt$.

Такое повышение энергетического состояния частиц обеспечивает улучшение условий физического контакта частиц с подложкой и соединения с ней за счет увеличения напорного и импульсного давлений частиц на подложку при ударе, что приводит к улучшению качества покрытий, а именно, к уменьшению пористости $П$ и увеличению прочностных характеристик покрытия (адгезии σ_a и когезии $\sigma_к$).

Выводы

1 Вследствие конкурентного характера влияния на процесс плазменного напыления его факторов актуальная задача оптимизации процесса является достаточно сложной. Это объясняется недостаточно развитой теорией плазменного напыления, включающего в себя электрические, газодинамические, физико-механические, тепловые процессы. Поэтому, несмотря на развитие методов математического моделирования, до сих пор основным источником информации о процессах плазменного напыления является эксперимент.

2 Высокая эффективность плазменного напыления достигается реализацией сверхзвуковых плазменных струй, использованием насадков на анодной части плазмотрона, модуляцией параметров, созданием плазмотронов с осевой подачей напыляемого материала, добавлением присадок в плазмообразующий газ. Несмотря на это данные подходы, за исключением сверхзвукового плазменного напыления, используются редко, что представляет интерес для их дальнейшего исследования и дает резервы их развития.

Библиографический список

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

2 Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.

3 Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М. : Машиностроение, 1981. – 192 с.

4 Лясников, В. Н. Планирование эксперимента при разработке технологии и оборудования плазменного напыления [Текст] / В. Н. Лясников, Б. Ф. Рыженко. – М. – 1982. – 68 с.

5 Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления : Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» [Текст] / А. Ф. Пузряков. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 360 с.

6 Хасуй, А. Техника напыления. Пер. с японского [Текст] / А. Хасуй. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

7 Костиков, В. И. Плазменные покрытия [Текст] / В. И. Костиков, Ю. А. Шестерин. – М. : Металлургия. – 1978. – 159 с.

8 Mash, D. R. Process variables in plasmajet spraying [Text] / D. R. Mash, N. E. Wearl, D. L. Walker. – J. of Metals. – 1961. – n. 7. – pp. 473-478.

9 Steffens, H. D. Adhesion by low pressure plasma spraying [Text] / H. D. Steffens, J. Beczkowiak // DVS-Ber, Thermal Spraying Conf., Essen. – 1983. – 80. – pp. 218-221.

10 Петров, С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности [Текст] / С. В. Петров, А. Г. Сааков. – Киев : ТОПАС. – 2000. – 220 с.

11 Клубникин, В. С. Сверхзвуковое плазменное напыление высокоплотных и прочных покрытий [Текст] : Труды 5-й Международной конференции "Пленки и покрытия 98" / В. С. Клубникин. – СПб., 1998. – С. 35-38.

12 Кадырметов, А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров [Текст] : монография / А. М. Кадырметов. – Воронеж : Научная книга, 2013. – 260 с.

13 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой [Текст] / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белащенко и др. – М. : Наука, 1990. – 480 с.

14 Кадырметов, А. М. Теоретические основы и технологическое обеспечение качества плазменного нанесения и упрочнения покрытий модуляцией электрических параметров [Текст] : диссертация докт. техн. наук : 05.02.07, 05.02. 08 / А. М. Кадырметов; ВГЛТА. Воронеж, 2013. – 383 с.

15 Kadyrmetov, A. M. Mathematical modeling of plasma deposition and hardening of coatings-switched electrical parameters / A. M. Kadyrmetov, S. N. Sharifullin, A. S. Pustovalov // Journal of Physics : Conference Series 669 (2016) 012052 : VII Conference on Low Temerature Plasma in the Processes of Functional Coating Preparation IOP Publishing, doi: 10.1088/1742-6596/669/1/012052. – 2016. – 5 p.

16 Kadyrmetov, A. M. Intensification of energy exchange in a heterogeneous plasma jet by modulation of the electric parameters of the plasma-spraying process [Text] / A. M. Kadyrmetov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – July. – Vol. 86. – No. 4. – pp. 789-797/ (www.springerlink.com/openurl.-asp?genre=article&id=doi:10.1007/s10891-013-0896-x).