УДК 621.793.74

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ МОДУЛЯЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ

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

Поверхности деталей машин должны обеспечивать стойкость к износным, динамическим и термическим воздействиям, коррозии и др. эксплуатационным нагрузкам. К прогрессивным способам решения этой задачи, в силу своих достоинств, относится нанесение функциональных покрытий плазменным напылением [1]. Однако оно 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, позволяет обеспечить его высокую энергетическую эффективность и заданные эксплуатационные характеристики покрытий: надежное соединение покрытия с основой; высокую и равномерную твердость поверхности трения; однородную структуру покрытия; отсутствие пор, раковин, трещин и других дефектов, высокое сопротивление усталости.

**Основные пути повышения эффективности плазменного напыления**

Поэтапная технологическая схема влияния факторов на критерии процесса представлена на рисунке 1 [5]. 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), варианты комплексных критериев [6, 7]).

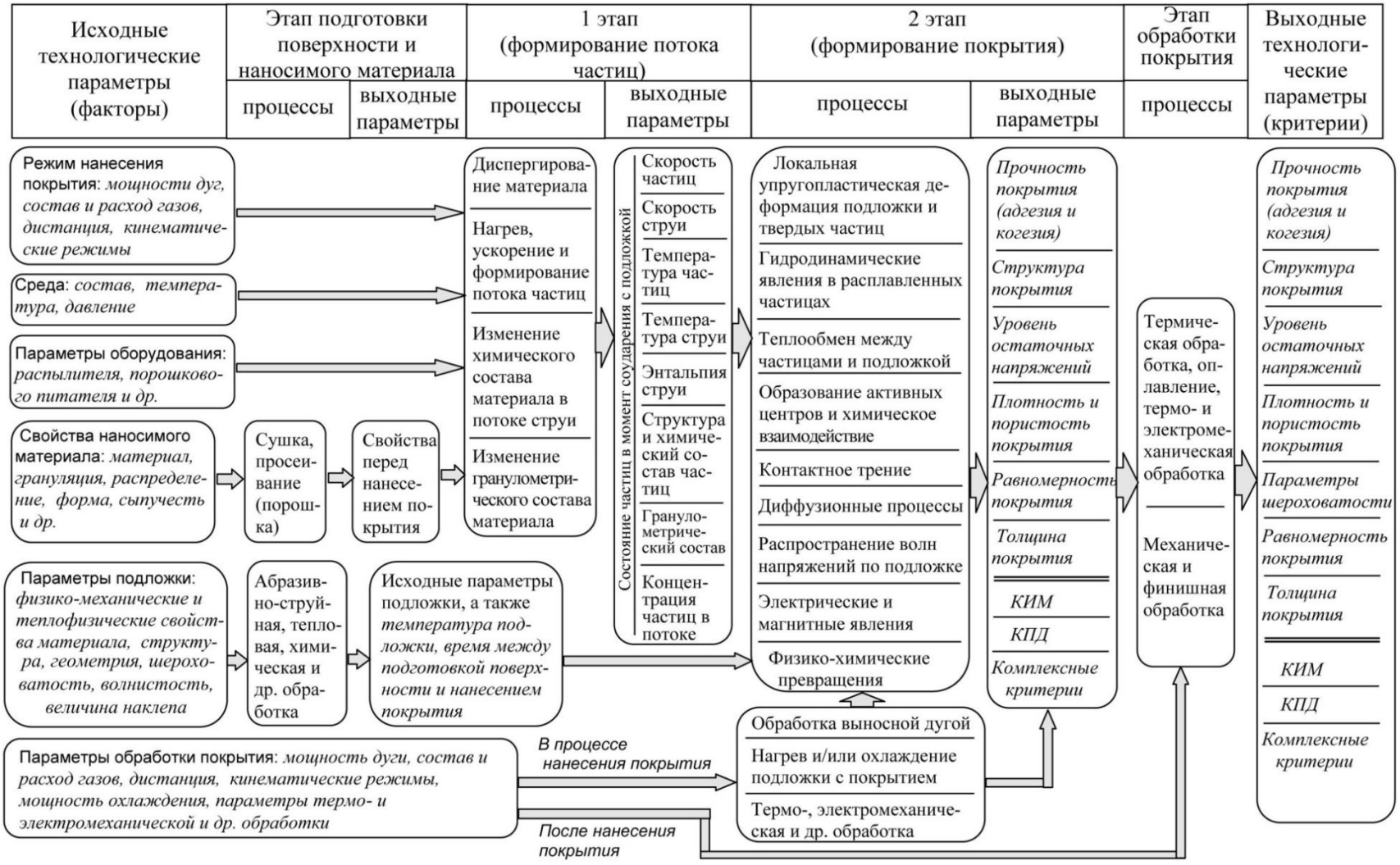


Рисунок 1 – Схема структурно-следственной связи факторов и критериев технологического процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий

Схема (рис. 1) показывает структурно-следственное влияние исходных факторов на критерии процессов через выходные параметры 1-го этапа, которые непосредственно влияют на процесс формирования покрытия и выходные параметры 2-го этапа, которые, в свою очередь, непосредственно влияют 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. Все множество факторов включает в себя шесть групп [5]:

1) Факторы, характеризующие способы стабилизации косвенной дуги плазмотрона (плазмотроны с самоустанавливающейся дугой, с анодным уступом, с межэлектродными вставками).

2) Конструктивные факторы (дозвуковое и сверхзвуковое напыление [8, 9], модуляция параметров [6, 10], место введения в плазмотрон напыляемого порошка, система охлаждения, наличие и параметры насадков [11]).

3) Режимные факторы (мощность дуги, расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов, расход напыляемого материла, дистанция напыления, скорость перемещения плазмотрона относительно поверхности).

4) Факторы напыляемого материала (размерный и композиционный состав частиц порошка, форма частиц, их физико-механические свойства).

5) Факторы, характеризующие параметры плазменной струи (они определяются факторами других групп).

6) Факторы внешней среды. Они имеют существенное значение для напыления в контролируемой атмосфере и в динамическом вакууме.

Влияние всего этого множества факторов на критерии процесса плазменного напыления носит конкурирующий характер, что обусловливает сложность и актуальность задачи его оптимизации. Сложность этой задачи 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 плазменном напылении является эксперимент.

Анализ возможностей совершенствования процесса плазменного напыления показывает, что его совершенствование может быть достигнуто реализаци-

ей сверхзвуковых плазменных струй [8, 9], использованием насадков на анодную часть плазмотрона [11], модуляцией параметров [10, 12, 13], созданием плазмотронов с осевой подачей напыляемого материала, добавлением присадок в плазмообразующий газ [8, 9], использованием двух- и трехдуговых плазмотронов с разными или общим анодом, двух- и трехмодульных плазмотронов с общей камерой, позволяющим осуществлять подачу напыляемого материала и присадок в виде суспензий по осевой схеме (вдоль осевой области плазменного потока, как это реализовано в плазмотроне 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.

**Эффективность плазменного нанесения и упрочения покрытий с модуляцией параметров**

Одним из наиболее эффективных методов совершенствования плазменного напыления является динамизация его параметров, которая наиболее просто реализуется с помощью модуляции электрических параметров. Физическая модель модуляции косвенной и прямой дуг плазмотрона представлена на рисунках 2 и 3 [12].

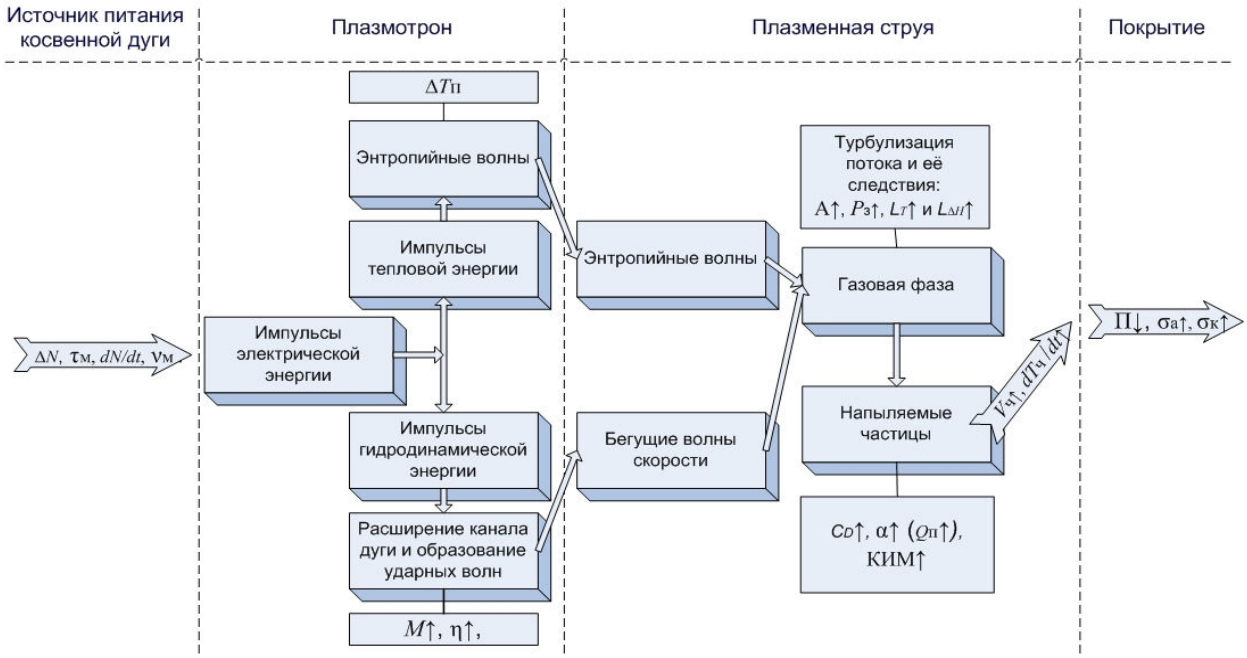


Рисунок 2 – Схема физической модели процессов плазменного напыления при модуляции электрических параметров косвенной дуги плазмотрона

Физическая модель плазменного напыления с модуляцией косвенной дуги (рис. 2) 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 $v_м$ и параметрами импульсов: длительностью $\tau_м$, амплитудой $\Delta N$ 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 $\alpha$ от плазменной струи, что вызывает рост коэффициента использования порошка КИМ и теплового КПД плазмотрона $\eta$, 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 $\sigma_а$ и когезии $\sigma_к$).

Структура физических процессов в системе «покрытие – основа» при модуляции мощности прямой дуги плазмотрона может быть изображена в виде схемы, представленной на рисунке 3. Данные процессы идентичны процессам, происходящим при модуляции косвенной дуги плазмотрона: импульсное выделение электрической энергии в дуге приводит к импульсному повышению в ней тепловой и гидродинамической энергий. Выделяемая в импульсе тепловая энергия в основном передается основе в пятне привязки дуги. Гидродинамическая энергия реализуется в увеличении давления на основу в пятне привязки дуги и в расширении канала дуги. Расширение канала дуги генерирует бегущие волны, направленные в данном случае перпендикулярно оси плазменной струи. Поскольку прямая дуга в отличие от косвенной не обжата плазмообразующим газом и не находится внутри канала, от которого могут отражаться ударные волны, энергия бегущих волн интенсивно падает обратно пропорционально квадрату расстояния от оси дуги, и её величиной можно пренебречь в сравнении с тепловой энергией. Вследствие этого основное технологическое воздействие модуляции мощности прямой дуги реализуется в выделении тепла и повышении давления на поверхности основы в месте опорного

пятна дуги [1]. При этом возможны два случая, которые определяются значениями параметров импульсов мощности прямой дуги: величиной импульсной мощности прямой дуги, формой импульса и его длительностью.

νм

Рисунок 3 – Схема физической модели процессов плазменного нанесения покрытия при модуляции электрических параметров прямой дуги плазмотрона:
$\Delta N_п$ – амплитуда мощности дуги

В первом случае происходит проплавление основы до переходной зоны «покрытие – основа» в местах привязки дуги во время действия импульсов, что соответствует формированию сварного участка покрытия с основой.

Во втором случае проплавления не происходит. Это реализуется при таких значениях параметров импульсов мощности прямой дуги и частоты модуляции, при которых обеспечивается равномерность нагрева основы при нанесении покрытия, или осуществляется закалка, или модификация основы.

Следовательно, импульсная модуляция прямой дуги при плазменном напылении за счет преобразования электрической энергии в тепловую позволяет, во-первых, за счет равномерно распределенного по поверхности дискретного проплавления покрытий повысить их прочностные характеристики и, во-вторых, обеспечить необходимую равномерность распределения температур и снизить уровень нагрева в сравнении с плазменной сплошной наплавкой или оплавлением.

Развитие технологии плазменного напыления с модуляцией электрических параметров и её использование в практике нанесения покрытий сдерживается неразработанностью теоретического мультифизического описания, включающего,

в первую очередь, разработку математической модели основных процессов.

**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.

3 Результатом модуляции мощностей косвенной и прямой дуг плазмотрона в процессе плазменного напыления является повышение энергии напыляемых частиц при их ударе о подложку, равномерное дискретно распределенное проплавление покрытия до границы с основой, равномерность температурного поля поверхности основы. В итоге все это обеспечивает высокие прочностные характеристики покрытия и их равномерность по всей поверхности. Развитие и широкое использование плазменного напыления с модуляцией параметров требует, в первую очередь, разработки математической модели, учитывающей все основные мультифизические процессы.

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 Кадырметов, А. М. Обзор вопросов эффективности плазменного напыления [Текст] / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, А. С. Пустовалов, Р. В. Мирзеханов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – № 1 (15). – 14 с. Режим доступа : https://yadi.sk/i/eU59k8OIsKSTQ.

6 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.

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

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

9 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.

10 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.

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

12 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.

13 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.

14 Kadyrmetov, A. M. Intensification of energy exchange in a heterogeneous plasma jet by modulation of the electric parameters of the plasma-spraying process [Текст] / 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).