

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ/METAL SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9>**НЕЙРО-НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН**

Научная статья

Тимохова О.М.¹, Тимохов Р.С.², Шакирзянов Д.И.^{3,*}, Чемшикова Ю.М.⁴¹ORCID : 0000-0003-3179-6382;²ORCID : 0000-0002-1474-7610;³ORCID : 0000-0002-1093-0290;⁴ORCID : 0000-0001-5675-3800;¹Сыктывкарский Лесной Институт, Сыктывкар, Российская Федерация^{2,3,4}Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (newkirito[at]gmail.com)

Аннотация

В работе предложена концепция оптимизации процесса плазменного напыления. Представлено моделирование технологического процесса плазменного напыления с модуляцией параметров косвенной и прямой дуг выполнено с применением гибридного нейро-нечеткого подхода. Исследуемыми управляющими факторами (входные данные модели) выступали параметры импульсной модуляции дугового разряда: амплитуда тока, частота и длительность импульсов. Критериями оптимизации (выходные данные модели) являлись структурно-механические характеристики покрытия: прочность сцепления и пористость.

Результатом моделирования плазменного напыления показывает, что импульсная модуляция мощности дуги обеспечивает два ключевых технологических преимущества: повышение адгезионной прочности покрытия за счёт формирования системы микросварных точек и снижение общего теплового ввода в деталь, что минимизирует риск термической деформации. Это позволяет рекомендовать разработанный подход для восстановления тонкостенных и термически чувствительных узлов лесных машин, работающих в условиях интенсивных абразивно-ударных нагрузок.

Разработанная компьютерная модель позволяет проводить оптимизацию технологических режимов нанесения плазменных покрытий. Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса напыления покрытий. Анализ аппроксимационных поверхностей, полученных в результате моделирования процесса плазменного напыления с модуляцией параметров прямой дуги, подтверждает адекватность и точность разработанной гибридной нейро-нечеткой модели.

Применение нейро-нечеткой оптимизации импульсного плазменного напыления открывает перспективы для создания адаптивных технологий восстановления, обеспечивающих высокий ресурс и надёжность ответственных деталей лесных машин в условиях агрессивной эксплуатации.

Ключевые слова: плазменное напыление, технологии восстановления, технологии упрочнения, лесные машины, динамическая модуляция, нейро-нечеткие сети, Anfis Matlab.

NEURO-FUZZY OPTIMISATION OF PLASMA SPRAYING FOR THE RESTORATION OF FORESTRY MACHINE PARTS

Research article

Timokhova O.M.¹, Timokhov R.S.², Shakirzyanov D.I.^{3,*}, Chemshikova Y.M.⁴¹ORCID : 0000-0003-3179-6382;²ORCID : 0000-0002-1474-7610;³ORCID : 0000-0002-1093-0290;⁴ORCID : 0000-0001-5675-3800;¹Syktvykar Forest Institute, Syktvykar, Russian Federation^{2,3,4}Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

* Corresponding author (newkirito[at]gmail.com)

Abstract

The paper suggests a concept for optimising the plasma spraying process. It presents a simulation of the plasma spraying process with modulation of indirect and direct arc parameters using a hybrid neuro-fuzzy approach. The control factors studied (model input data) were the parameters of pulse modulation of the arc discharge: current amplitude, frequency, and pulse duration. The optimisation criteria (model output data) were the structural and mechanical characteristics of the coating: adhesion strength and porosity.

The results of plasma spraying modelling show that pulse modulation of arc power provides two key technological advantages: increased adhesive strength of the coating due to the creation of a system of micro-welded points and reduced overall heat input into the part, which minimises the risk of thermal deformation. This allows to recommend the developed approach for the restoration of thin-walled and thermally sensitive components of forestry machines operating under conditions of intense abrasive and impact loads.

The developed computer model allows optimisation of the technological modes of plasma coating application. The software and mathematical complex is used to study and optimise the coating spraying process. Analysis of the approximation surfaces obtained as a result of modelling the plasma spraying process with modulation of the parameters of a straight arc confirms the adequacy and accuracy of the developed hybrid neuro-fuzzy model.

The application of neuro-fuzzy optimisation of pulse plasma spraying offers prospects for the creation of adaptive restoration technologies that ensure high durability and reliability of critical components of forestry machines under aggressive operating conditions.

Keywords: plasma spraying, restoration technologies, strengthening technologies, forestry machines, dynamic modulation, neuro-fuzzy networks, Anfis Matlab.

Введение

Совершенствование технологий восстановления и упрочнения ответственных деталей лесных машин — таких как направляющие гидроцилиндров, валы, шнеки и режущие кромки — является ключевой задачей для повышения их ресурса и общей надёжности в условиях интенсивных ударных, абразивных и коррозионных нагрузок. Плазменное напыление, обеспечивающее формирование высокопрочных износостойких покрытий из тугоплавких материалов (карбидов, боридов, оксидов), занимает центральное место среди методов поверхностного модифицирования. Однако традиционные режимы непрерывной дуги зачастую сопряжены с рядом технологических ограничений: локальный перегрев и термическая деформация тонкостенных деталей, недостаточная адгезия и повышенная пористость слоя, а также низкий коэффициент использования порошкового материала. Эти факторы напрямую влияют на долговечность восстановленных узлов в агрессивной среде лесозаготовки.

Перспективным направлением преодоления указанных ограничений является внедрение импульсных режимов плазменного напыления с модуляцией электрических параметров дугового разряда. Динамическое управление мощностью дуги позволяет целенаправленно трансформировать термогазодинамическую структуру плазменной струи: интенсифицировать тепло- и массообмен, генерировать ударные волны, увеличивать скорость и температуру частиц порошка. Это, в свою очередь, способствует повышению плотности покрытия, улучшению его сцепления с основой и снижению общего теплового ввода в деталь. Особый интерес представляет сравнительный анализ механизмов воздействия для плазмотронов различного принципа действия — косвенной (несвязанной) и прямой дуги. В первом случае основной акцент делается на максимизацию кинетической энергии частиц, во втором — на управляемое тепловое воздействие в области анодного пятна, что может приводить к локальному микропроплавлению основы и формированию сварных соединений на границе раздела.

Несмотря на растущий интерес к импульсным технологиям, задача комплексного моделирования и оптимизации такого многопараметрического процесса, где управляющими факторами являются амплитуда, частота и длительность импульсов, остаётся актуальной. Особенно это важно для адаптации технологии к восстановлению конкретных деталей лесных машин, требующих баланса между высокой адгезионной прочностью и минимальной термической деформацией.

Имеется значительное количество работ, посвященных процессу плазменного напыления, но эти работы либо касаются эффективности плазменного напыления [1], [2], либо ограничиваются решением задач моделирования только отдельных стадий процесса плазменной переработки с чисто математическим их описанием без конкретной программной реализации [3], [4], [5], [7].

Целью настоящей работы являлась разработка математической модели процесса плазменного напыления с модуляцией параметров косвенной дуги.

Методы и принципы исследования

В этой связи для решения задачи комплексного управления процессом напыления наиболее перспективным является использование методов динамической модуляции. Повышение качества износостойких плазменных покрытий обеспечивается за счёт двух основных подходов:

- модуляция электрических параметров при плазменном напылении;
- комбинированное электромеханическое воздействие на формируемый слой.

Динамическое управление параметрами плазменного процесса является одним из эффективных методов совершенствования технологии и его оптимизации. Оно позволяет целенаправленно влиять на тепловые и газодинамические процессы путём модуляции мощностей дуг плазмотрона. Конкретные механизмы такого управления различаются в зависимости от типа используемого плазмотрона — прямого или косвенного действия.

Для плазмотрона косвенного действия управление динамикой направлено на максимизацию мощности импульсов дуги, что необходимо для повышения кинетической энергии напыляемых частиц.

Для плазмотрона прямого действия ключевая задача – генерация импульсов мощности, которые обеспечивают оптимальную плотность распределения при проплавлении покрытия; формирование равномерного температурного поля с минимальным разбросом.

Техническая реализация управления основана на регулировке параметров модулятора: амплитуды импульсов, дуги, частоты модуляции, длительности импульсов.

Модель процесса модуляции для дуг косвенного и прямого действия схематично представлены на рисунках 1 и 5.

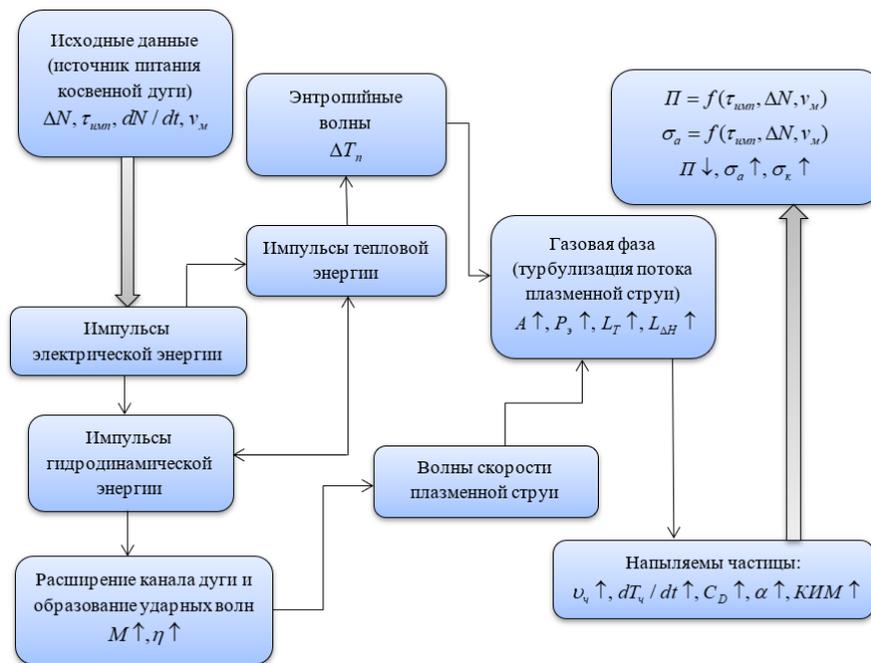


Рисунок 1 - Модель процесса модуляции косвенной дуги плазматрона
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.1>

Преобразование модулированной электрической энергии импульсов в тепловую и газодинамическую составляющие, определяющее ключевые параметры плазменной струи, энергию напыляемых частиц и общий КПД процесса, моделируется в рамках физической модели плазменного напыления с модуляцией косвенной дуги. Характер протекающих в струе физических процессов определяется частотой модуляции ν_m , а также временными (τ_m) и энергетическими ($\Delta N, dN/dt$) параметрами импульсов.

Основные термодинамические процессы, происходящие при модуляции мощности дуги, заключаются в следующем:

- Газодинамическая трансформация плазменного потока: генерация энтропийных и ударных волн, индуцирование турбулентности, выравнивание поперечного профиля скорости (A) и увеличение протяжённости зон с высокими значениями температуры (L_T) и энтальпии ($L_{\Delta H}$).

- Интенсификация взаимодействия «струя — частица»: рост коэффициентов аэродинамического сопротивления (C_D) и теплопередачи (α), что приводит к повышению эффективности увлечения и нагрева порошка, выражающейся в увеличении коэффициента использования материала и теплового КПД плазматрона (η).

- Рост кинетической и тепловой энергий частиц: увеличение скорости движения частиц (V_q) и скорости их нагрева (dT_q/dt).

Такой термодинамический характер струи позволяет повысить энергетическое состояние частиц и при соударении их с подложкой обуславливает улучшение условий формирования покрытия. За счёт роста динамического и импульсного давления усиливается деформация и физический контакт «частица — подложка», что в конечном итоге модифицирует структуру и свойства покрытия: снижает пористость (Π) и повышает его прочностные характеристики, а именно адгезионную (σ_a) и когезионную (σ_k) прочность.

Моделирование технологического процесса плазменного напыления с модуляцией параметров косвенной и прямой дуг выполнено с применением гибридного нейро-нечеткого подхода. Исследуемыми управляющими факторами (входные данные модели) выступали параметры импульсной модуляции дугового разряда: амплитуда тока, частота и длительность импульсов. Критериями оптимизации (выходные данные модели) являлись структурно-механические характеристики покрытия: прочность сцепления и пористость.

В программной среде математического моделирования *Anfis Matlab* на основе методов нейро-нечеткого вывода разработана математическая модель процесса плазменного напыления с модуляцией параметров косвенной дуги.

Входные параметры модели:

- амплитуда импульсов дуги, ΔN , варьируемая в диапазоне 10...20 А;
- частота модуляции, ν , постоянная величина 7500 Гц;
- длительность импульсов, $t_{имп}$, варьируемая в диапазоне 40...50 мкс.

Выходные параметры модели (прогнозируемые характеристики покрытия):

- прочность покрытия, σ_a , МПа;
- пористость покрытия, Π , %.

Верификация адекватности разработанной модели проводилась посредством анализа в редакторе правил системы нечёткого вывода *Rule Viewer* (рисунок 2).

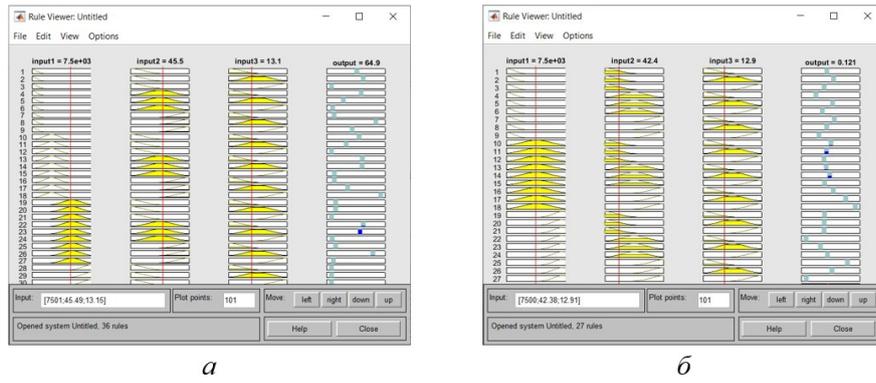


Рисунок 2 - Редактор правил *Rule Viewer* с отображением выходных параметров:

a – прочность соединения; *б* – пористость покрытия

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.2>

Примечание: модуляция косвенной дугой

Визуализация построенной модели выполнена с использованием инструмента просмотра поверхности *View/Surface* (рисунки 3, 4).

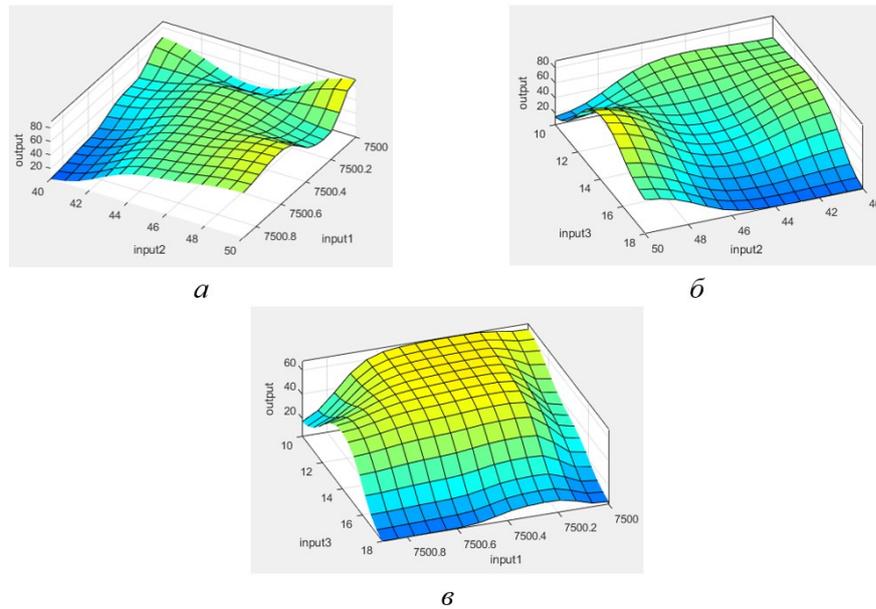


Рисунок 3 - Модель плазменного напыления с модуляцией косвенной дугой:

a – $\sigma = f(\tau_{имп}, v)$; *б* – $\sigma = f(\tau_{имп}, \Delta N)$; *в* – $\sigma = f(v, \Delta N)$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.3>

Примечание: целевая функция – прочность соединения

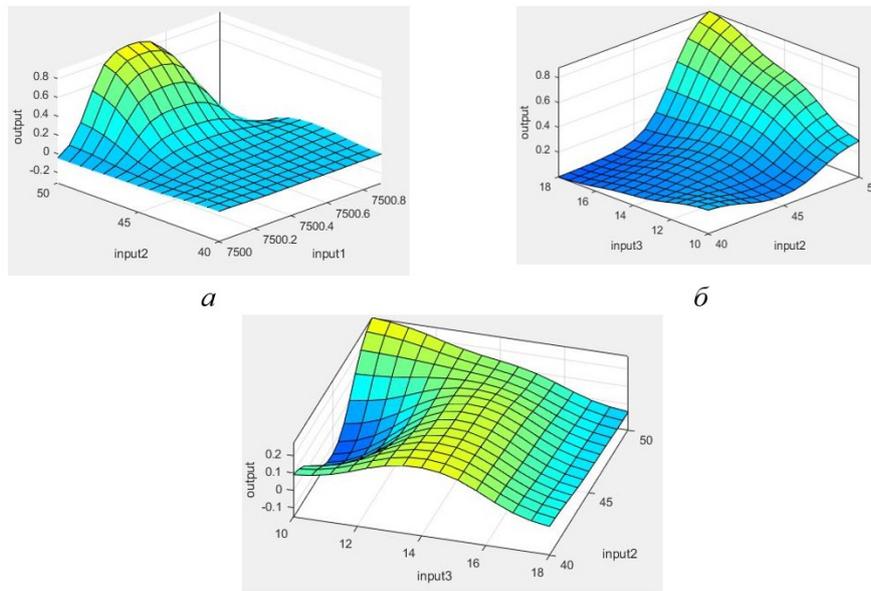


Рисунок 4 - Модель плазменного напыления с модуляцией косвенной дуги:

$$a - P = f(\tau_{имп}, v); \quad б - P = f(\tau_{имп}, \Delta N); \quad в - P = f(v, \Delta N)$$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.4>

Примечание: целевая функция – пористость покрытия

Анализ аппроксимационных поверхностей, полученных в результате нейро-нечеткого моделирования процесса плазменного напыления при модуляции параметров косвенной дуги, подтверждает адекватность построенной модели.

Модуляция мощности прямой дуги представлена в виде схемы физического процесса в системе «покрытие – основа» (рисунок 5).

Указанные процессы аналогичны процессам, возникающим при модуляции косвенной дуги, а именно: импульсное выделение электрической энергии в дуговом разряде приводит к скачкообразному росту тепловой и гидродинамической составляющих энергии. Сгенерированная в импульсе тепловая энергия преимущественно передаётся подложке в области анодного пятна. Возрастание давления на подложку в зоне пятна, а также расширение канала дуги обеспечивается гидродинамической энергией. Расширение канала дуги инициирует распространение бегущих волн, вектор распространения которых ортогонален оси плазменной струи. В отличие от косвенной дуги, прямая дуга не ограничена стенками канала плазмотрона и не подвержена сжатию плазмообразующим газом, что исключает отражение ударных волн от стенок. Вследствие этого энергия бегущих волн быстро затухает, уменьшаясь обратно пропорционально квадрату расстояния от оси дуги, и её вклад становится пренебрежимо малым по сравнению с тепловой энергией.

Ключевое технологическое воздействие модуляции мощности прямой дуги заключается в локализованном тепловыделении и увеличении давления на поверхность подложки в области анодного пятна. Термодинамические параметры импульсного режима, такие как импульсная мощность, длительность и форма импульса, являются определяющими для данного процесса.



Рисунок 5 - Модель процесса модуляции прямой дуги плазматрона
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.5>

Применяя аналогичный методологический подход, выполнено нейро-нечеткое моделирование процесса плазменного напыления в условиях модуляции электрических параметров прямой дуги.

Входные параметры модели:

- амплитуда импульсов дуги, ΔN в диапазоне 30...18 А;
- частота модуляции, ν — 1000...10 Гц;
- длительность импульсов, $\tau_{имп}$ в диапазоне 0,4...0,5 мкс.

Выходные параметры модели (прогнозируемые характеристики покрытия):

- прочность покрытия, σ , МПа;
- пористость покрытия, Π (%).

Оценка корректности и адекватности модели проводилась путём анализа и визуализации её логической структуры в редакторе правил системы нечеткого вывода Rule Viewer (рисунок 6).



Рисунок 6 - Редактор правил Rule Viewer с отображением выходных параметров:

а – прочность соединения; б – пористость покрытия

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.6>

Примечание: модуляция прямой дугой

Поверхности отклика построенной модели, отражающие зависимости выходных параметров от входных факторов, визуализированы с использованием модуля View/Surface (рисунки 7, 8).

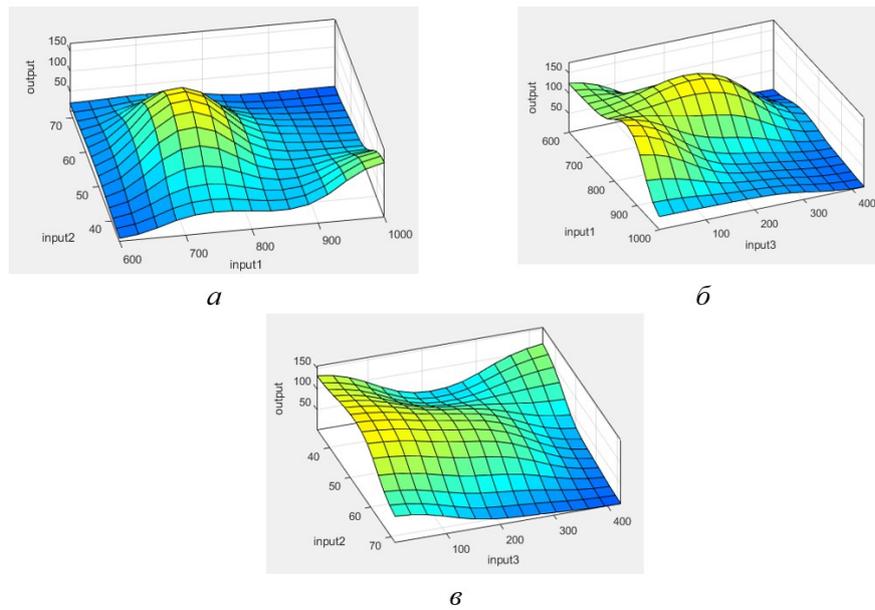


Рисунок 7 - Модель процесса плазменного напыления с модуляцией параметров прямой дуги:

$$а - \sigma = f(\tau_{\text{лпн}}, v); \quad б - \sigma = f(v, \Delta N); \quad в - \sigma = f(\tau_{\text{лпн}}, \Delta N)$$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.7>

Примечание: выходная переменная – прочность соединения

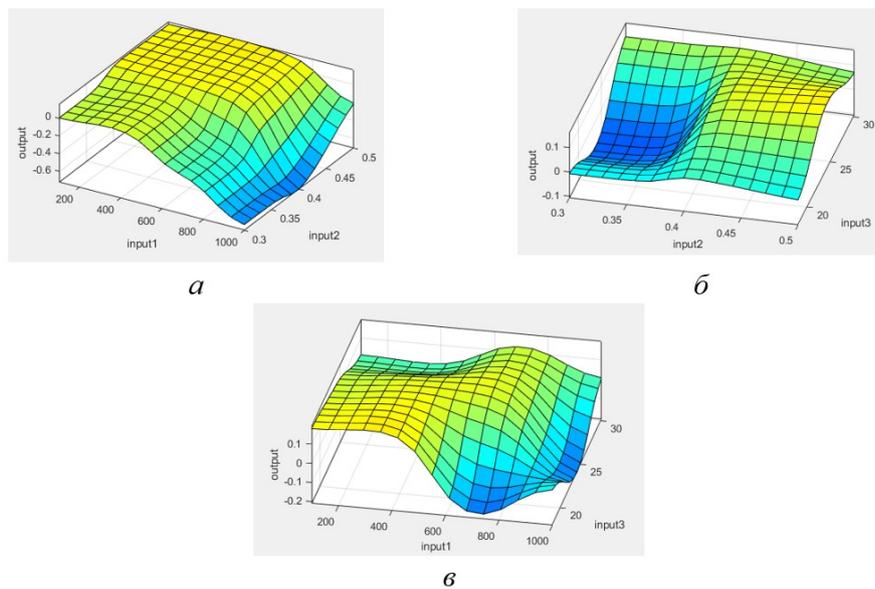


Рисунок 8 - Модель процесса плазменного напыления с модуляцией параметров прямой дуги:

$$а - \Pi = f(\tau_{\text{лпн}}, v); \quad б - \Pi = f(\tau_{\text{лпн}}, \Delta N); \quad в - \Pi = f(v, \Delta N)$$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.8>

Примечание: выходная переменная – пористость покрытия

Основные результаты

Анализ аппроксимационных поверхностей, полученных в результате моделирования процесса плазменного напыления с модуляцией параметров прямой дуги, подтверждает адекватность и точность разработанной гибридной нейро-нечеткой модели.

Результаты апробации моделей на тестовых примерах представлены в таблице

Таблица 1 - Результаты верификации модели на тестовой выборке для процессов с косвенной и прямой дугой

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.9.9>

Частота модуляции, ν (input 1)	Длительность импульсов, $\tau_{имп}$ (input 2)	Амплитуда импульсов, ΔN (input 3)	Прочность соединения, σ_a (output)	Пористость покрытия, P (output)
Косвенная дуга	–	–	–	–
7500	45,5	13,1	64,9	0,122
7500	44,8	13,1	62,2	0,137
7500	45,2	13,5	63,2	0,138
7500	46,3	14,2	63,6	0,117
7500	43,3	14,7	64,3	0,114
Прямая дуга	–	–	–	–
716	0,54	26,8	118,8	0,133
799	0,48	21,5	118,2	0,130
699	0,47	22,7	128,6	0,122
550	0,51	18,7	134,3	0,09
500	0,46	18,2	135,7	0,05

Обсуждение

В зависимости от параметров импульса наблюдаются два механизма взаимодействия. В первом режиме импульсное энерговыделение в области анодного пятна вызывает локальное проплавление подложки до границы раздела фаз «покрытие–основа», приводящее к образованию точечных сварных соединений. Во втором режиме проплавление исключается за счёт подбора параметров модуляции (амплитуда и длительность импульса мощности, частота), обеспечивающих либо равномерный нагрев подложки в процессе осаждения, либо её поверхностную термообработку (закалку или модификацию).

Таким образом, импульсная модуляция мощности прямой дуги, основанная на трансформации электрической энергии в тепловую, обеспечивает два ключевых технологических преимущества. Во-первых, формирование равномерно распределённой системы микросварных точек повышает адгезионную прочность покрытия. Во-вторых, достигается более контролируемое и равномерное распределение температуры, что снижает общий тепловой ввод в подложку по сравнению с процессами непрерывной плазменной наплавки.

Заключение

Проведённое исследование было направлено на разработку и оптимизацию технологии импульсного плазменного напыления износостойких покрытий для восстановления ответственных деталей лесных машин.

В работе решена актуальная задача преодоления технологических ограничений традиционных методов, таких как локальный перегрев, недостаточная адгезия и повышенная пористость, за счёт внедрения динамического управления параметрами дугового разряда.

Результаты работы демонстрируют, что импульсная модуляция мощности дуги обеспечивает два ключевых технологических преимущества:

- повышение адгезионной прочности покрытия за счёт формирования системы микросварных точек;
- снижение общего теплового ввода в деталь, что минимизирует риск термической деформации.

Это позволяет рекомендовать разработанный подход для восстановления тонкостенных и термически чувствительных узлов лесных машин, работающих в условиях интенсивных абразивно-ударных нагрузок.

Таким образом, применение нейро-нечеткой оптимизации импульсного плазменного напыления открывает перспективы для создания адаптивных технологий восстановления, обеспечивающих высокий ресурс и надёжность ответственных деталей лесных машин в условиях агрессивной эксплуатации.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.



Список литературы / References

1. Кравченко И.Н. Оптимизация параметров и режимов плазменного напыления и плазменного оплавления покрытий / И.Н. Кравченко, С.В. Карцев, Ю.А. Кузнецов и др. // Новые огнеупоры. — 2021. — № 1. — С. 52–56.
2. Кадырметов А.М. Перспективные направления совершенствования технологии плазменного напыления с импульсной модуляцией тока дуги / А.М. Кадырметов, Е.В. Снятков, А.А. Плахотин // Воронежский научно-технический Вестник. — 2022. — № 1 (39). — С. 3–14.
3. Трифонов Г.И. Влияние технологических режимов плазменного напыления на прочность сцепления покрытия с винтовой основой детали / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2024. — № 3. — С. 29–35.
4. Кравченко И.Н. Оценка влияния технологических режимов плазменного нанесения покрытий на толщину формируемого слоя / И.Н. Кравченко, Ю.А. Кузнецов, Н.С. Баранова и др. // Технический сервис машин. — 2024. — № 1. — С. 44–50.
5. Кравченко И.Н. Влияние технологических параметров плазменного напыления на формирование защитных и функциональных покрытий / И.Н. Кравченко, С.Ю. Жачкин, Е.П. Тимашов // Новые огнеупоры. — 2023. — № 7. — С. 33–37.
6. Жачкин С.Ю. Экспериментальное исследование влияния технологических режимов плазменного напыления на толщину формируемого покрытия / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, О.К. Битюцких // Воздушно-космические силы. Теория и практика. — 2023. — № 25. — С. 42–52.
7. Кравченко И.Н. Исследование закономерностей влияния температурно-временных параметров плазменного оплавления на уровень остаточных напряжений в покрытиях / И.Н. Кравченко, С.В. Карцев, Г.И. Бондарева // Вестник НГИЭИ. — 2022. — № 9 (136). — С. 41–52.
8. Тимохова О.М. Повышение надёжности лесных машин путём совершенствования технологии и методов их восстановления dis.. ...Doctor of Sciences: 05.21.01 : защищена 2022-09-30 : утв. 2023-03-30 / О.М. Тимохова. — Йошкар-Ола: 2022. — 381 с.
9. Кадырметов А.М. Повышение эффективности плазменного напыления модуляцией параметров / А.М. Кадырметов, О.М. Тимохова, А.С. Пустовалов // Воронежский научно-технический Вестник. — 2017. — № 1 (19). — С. 129–136.
10. Тимохова О.М. Восстановление клапанов двигателей внутреннего сгорания плазменной наплавкой и напылением с модуляцией параметров / О.М. Тимохова, А.М. Кадырметов, Е.В. Снятков и др. // Воронежский научно-технический Вестник. — 2018. — № 1 (23). — С. 53067.
11. Кадырметов А.М. Обзор вопросов эффективности плазменного напыления / А.М. Кадырметов, Е.В. Снятков, А.С. Пустовалов // Воронежский научно-технический Вестник. — 2017. — № 3 (21). — С. 11–22.
12. Кадырметов А.М. Физическая модель механизмов динамизации процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий с помощью модуляции электрических параметров / А.М. Кадырметов, Г.А. Сухочев, А.Ф. Мальцев и др. // Научные технологии в машиностроении. — 2013. — № 10. — С. 19–26.
13. Кадырметов А.М. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах / А.М. Кадырметов, Д.И. Станчев, Г.А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2010. — № 7 (67). — С. 29–36.
14. Тимохова О.М. Вопросы технологического обеспечения плазменного напыления и упрочнения покрытий деталей машин / О.М. Тимохова // Воронежский научно-технический вестник. — 2017. — № 4 (22). — С. 16–31.
15. Timokhova O. Controlling the Stress State of the Coating during Plasma Spraying / O. Timokhova, D. Shakirzyanov, R. Timokhov // Materials Science Forum. — Kapellenweg: Trans TechPublications Ltd, 2022. — Iss. 1049. — P. 144–151.
16. Timokhova O. Analysis of the influence of surfacing modes on the structure of metal / O. Timokhova, O. Burmistrova // Natural and Technical Sciences. — 2018. — № 11. — P. 313–317.
17. Timokhova O. Technological, cycle and actual productivity of the surfacing process in the restoration of the surfacing process in the restoration of parts of forest machines / O. Timokhova, O. Burmistrova, D. Shakirzyanov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — Bristol: IOP Publishing, 2020. — Iss. 839.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kravchenko I.N. Optimizaciya parametrov i rezhimov plazmennogo napy'leniya i plazmennogo oplavleniya pokry'tij [Optimization of parameters and modes of plasma spraying and plasma melting of coatings] / I.N. Kravchenko, S.V. Karcev, Yu.A. Kuznecov et al. // New Refractories. — 2021. — № 1. — P. 52–56. [in Russian]
2. Kady'rmetov A.M. Perspektivny'e napravleniya sovershenstvovaniya texnologii plazmennogo napy'leniya s impul'snoj modulyaciej toka dugi [Promising directions for improving the technology of plasma spraying with pulsed modulation of the arc current] / A.M. Kady'rmetov, E.V. Snyatkov, A.A. Plaxotin // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. — 2022. — № 1 (39). — P. 3–14. [in Russian]
3. Trifonov G.I. Vliyanie texnologicheskix rezhimov plazmennogo napy'leniya na prochnost' scepleniya pokry'tiya s vintovoj osnovoj detali [The influence of plasma spraying process modes on the adhesion strength of the coating to the screw base of the part] / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin // All materials: encyclopedic reference book. — 2024. — № 3. — P. 29–35. [in Russian]
4. Kravchenko I.N. Ocenka vliyaniya texnologicheskix rezhimov plazmennogo naneseniya pokry'tij na tolshhinu formiruemogo sloya [Evaluation of the influence of technological modes of plasma coating application on the thickness of the formed layer] / I.N. Kravchenko, Yu.A. Kuznecov, N.S. Baranova et al. // Machinery Technical Service. — 2024. — № 1. — P. 44–50. [in Russian]



5. Kravchenko I.N. Vliyanie tekhnologicheskix parametrov plazmennogo napy'leniya na formirovanie zashhitny'x i funktsional'ny'x pokry'tij [The influence of technological parameters of plasma spraying on the formation of protective and functional coatings] / I.N. Kravchenko, S.Yu. Zhachkin, E.P. Timashov // *New Refractories*. — 2023. — № 7. — P. 33–37. [in Russian]
6. Zhachkin S.Yu. E'ksperimental'noe issledovanie vliyaniya tekhnologicheskix rezhimov plazmennogo napy'leniya na tolshhinu formiruемого pokry'tiya [Experimental study of the influence of plasma spraying technological modes on the thickness of the formed coating] / S.Yu. Zhachkin, G.I. Trifonov, O.K. Bituyczkix // *Aerospace forces. Theory and practice*. — 2023. — № 25. — P. 42–52. [in Russian]
7. Kravchenko I.N. Issledovanie zakonomernostej vliyaniya temperaturno-vremenny'x parametrov plazmennogo oplavleniya na uroven' ostatochny'x napryazhenij v pokry'tiyax [Study of the influence of temperature-time parameters of plasma melting on the level of residual stresses in coatings] / I.N. Kravchenko, S.V. Karcev, G.I. Bondareva // *Bulletin of NGIEI*. — 2022. — № 9 (136). — P. 41–52. [in Russian]
8. Timoxova O.M. Povy'shenie nadyozhnosti lesny'x mashin putyom sovershenstvovaniya tekhnologii i metodov ix vosstanovleniya [Increasing the reliability of forestry machines by improving the technology and methods of their restoration] dis....of PhD in : 05.21.01 : defense of the thesis 2022-09-30 : approved 2023-03-30 / O.M. Тимохова. — Joshkar-Ola: 2022. — 381 p. [in Russian]
9. Kady'rmetov A.M. Povy'shenie e'ffektivnosti plazmennogo napy'leniya modulyaciej parametrov [Improving the efficiency of plasma spraying by modulating parameters] / A.M. Kady'rmetov, O.M. Timoxova, A.S. Pustovalov // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. — 2017. — № 1 (19). — P. 129–136. [in Russian]
10. Timoxova O.M. Vosstanovlenie klapanov dvigatelej vnutrennego sgoraniya plazmennoj naplavkoj i napy'leniem s modulyaciej parametrov [Restoration of internal combustion engine valves using plasma surfacing and spraying with parameter modulation] / O.M. Timoxova, A.M. Kady'rmetov, E.V. Snyatkov et al. // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. — 2018. — № 1 (23). — P. 53067. [in Russian]
11. Kady'rmetov A.M. Obzor voprosov e'ffektivnosti plazmennogo napy'leniya [A Review of Plasma Spraying Efficiency Issues] / A.M. Kady'rmetov, E.V. Snyatkov, A.S. Pustovalov // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. — 2017. — № 3 (21). — P. 11–22. [in Russian]
12. Kady'rmetov A.M. Fizicheskaya model' mexanizmov dinamizacii processov plazmennogo naneseniya i uprochneniya pokry'tij s pomoshh'yu modulyacii e'lektricheskix parametrov [A physical model of the mechanisms for dynamizing the processes of plasma deposition and hardening of coatings using modulation of electrical parameters] / A.M. Kady'rmetov, G.A. Suxochev, A.F. Mal'cev et al. // *Materials Science in Mechanical Engineering*. — 2013. — № 10. — P. 19–26. [in Russian]
13. Kady'rmetov A.M. Tekhnologiya plazmennogo naneseniya i uprochneniya pokry'tij v resursosberegayushhix proizvodstvenny'x processax [Plasma coating technology for resource-saving manufacturing processes] / A.M. Kady'rmetov, D.I. Stanchev, G.A. Suxochev // *Technologies of Coatings and Surface Hardening*. — 2010. — № 7 (67). — P. 29–36. [in Russian]
14. Timoxova O.M. Voprosy' tekhnologicheskogo obespecheniya plazmennogo napy'leniya i uprochneniya pokry'tij detalej mashin [Hardening technologies and technological support issues for plasma spraying and hardening of machine part coatings] / O.M. Timoxova // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. — 2017. — № 4 (22). — P. 16–31. [in Russian]
15. Timokhova O. Controlling the Stress State of the Coating during Plasma Spraying / O. Timokhova, D. Shakirzyanov, R. Timokhov // *Materials Science Forum*. — Kapellenweg: Trans TechPublications Ltd, 2022. — Iss. 1049. — P. 144–151.
16. Timokhova O. Analysis of the influence of surfacing modes on the structure of metal / O. Timokhova, O. Burmistrova // *Natural and Technical Sciences*. — 2018. — № 11. — P. 313–317.
17. Timokhova O. Technological, cycle and actual productivity of the surfacing process in the restoration of the surfacing process in the restoration of parts of forest machines / O. Timokhova, O. Burmistrova, D. Shakirzyanov et al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. — Bristol: IOP Publishing, 2020. — Iss. 839.