

УДК 577.21:612.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ВАЛА С ВАРЬИРОВАНИЕМ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ

Караганов В.Н.

аспирант кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава РУТ (МИИТ) г. Москва

e-mail: vn.12_karaganov@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрена расчетно-методическая постановка исследования плазменно-порошковой наплавки цилиндрического вала при изменении электрических и кинематических параметров процесса. Предложена двухуровневая модель, объединяющая расчет погонной энергии с приближенной оценкой теплового поля от движущегося источника и регламентом последующего трехмерного теплового расчета для цилиндрической детали. Для трех условных технологических режимов определены величины подводимой и эффективной погонной энергии, сформулированы ожидаемые изменения глубины проплавления, разбавления присадочного металла, скорости охлаждения и структуры наплавленного слоя. Показано, что увеличение энергии само по себе не гарантирует повышения твердости или износостойкости из-за противодействующих эффектов формирования сплошного слоя и перемешивания с основным металлом. Указаны ограничения аналитической модели, перечень измерений для ее верификации и критерии выбора режима. Результаты относятся к иллюстративному расчету, а не к проведенным испытаниям образцов.

Ключевые слова: *плазменно-порошковая наплавка, вал, погонная энергия, теплопередача, модель Розенталя, температурный цикл, разбавление, микроструктура, твердость.*

MODELING PLASMA TRANSFERRED ARC POWDER CLADDING OF A SHAFT AT DIFFERENT LINEAR HEAT INPUTS TO ASSESS THE CLAD MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES

Karaganov V.N.

Postgraduate student at the Department of Transport Engineering Technology and Rolling Stock Repair, RUT (MIIT), Moscow

e-mail: vn.12_karaganov@yandex.ru

Abstract

A calculation-based methodological study of plasma transferred arc powder cladding on a cylindrical shaft is presented. A two-level framework combines heat-input calculations and a simplified moving-source temperature estimate with a proposed three-dimensional transient thermal model for the actual cylindrical geometry. Three illustrative process settings are compared in terms of nominal and effective linear heat input. Expected trends in penetration, substrate dilution, cooling, and coating microstructure are discussed without attributing unmeasured hardness or wear values to the model. The limitations of the analytical approximation, validation measurements and practical selection criteria are specified. The numerical examples represent calculations rather than newly performed experiments.

Keywords: *plasma transferred arc cladding, shaft, linear heat input, thermal modeling, Rosenthal solution, dilution, microstructure, hardness.*

Введение

Поверхности валов, работающих в условиях трения, ударных нагрузок и абразивного изнашивания, нередко требуют восстановления геометрии либо формирования слоя с более высокими эксплуатационными характеристиками. Плазменно-порошковая наплавка (plasma

transferred arc, РТА) представляет собой способ нанесения порошкового материала с формированием металлургической связи с подложкой. В отличие от механически удерживаемого покрытия наплавленный слой возникает при локальном плавлении присадки и поверхностной части основного металла. Такое соединение обеспечивает прочность контакта, но одновременно делает параметры тепловложения определяющими для свойств переходной зоны [2, 3].

В инженерной практике одним из наиболее удобных обобщенных показателей режима является погонная энергия: электрическая энергия, приходящаяся на единицу длины траектории дуги. При прочих равных ее изменение сказывается на размерах жидкой ванны и длительности термического воздействия. Однако однозначная зависимость «больше энергия – лучше слой» отсутствует: чрезмерное проплавление увеличивает долю компонентов стали в наплавленном сплаве, а недостаточное может вызвать несплошность, поры и слабое сплавление [3, 4].

Особенность наплавки вала состоит в кривизне поверхности и одновременном влиянии продольной подачи, окружной скорости и шага винтовой траектории. Поэтому плоская модель нагрева полезна для предварительной оценки, но должна рассматриваться только как приближение. При многопроходной обработке ранее уложенный валик нагревается вновь; это меняет температурный цикл, формирование зерен, остаточные напряжения и вероятность появления трещин.

Цель работы – разработать воспроизводимую расчетную схему сопоставления режимов плазменно-порошковой наплавки вала по погонной энергии, определить направления ожидаемых структурных изменений и установить условия экспериментальной проверки прогноза. Новизна методического подхода заключается в явном отделении точно вычисляемых энергетических параметров от параметров, которые нельзя определить без данных о материале и реальной геометрии ванны.

Методы и методики

Рассматривается стальной цилиндрический вал радиусом 25 мм, на поверхность которого по винтовой траектории подается порошок никелевого самофлюсующегося типа Ni-Cr-Si-B. Указанные размер и материал выбраны как расчетный пример, а не описание экспериментальной установки. Состав порошка, его гранулометрия, фактические температурные зависимости теплофизических свойств и расходы газа должны уточняться при переходе к конкретной технологии. Сравнение трех режимов проводится при условии одинаковых геометрии, состава присадки, начальной температуры и способа подачи порошка.

Для предварительной модели предполагаются постоянное напряжение дуги, заданный эффективный коэффициент передачи энергии подложке, установившееся движение теплового источника и отсутствие изменения коэффициентов теплоотдачи между режимами. Коэффициент эффективности принимается равным 0,65 исключительно как параметр чувствительности модели; для оборудования и конкретного материала его необходимо определять по калориметрическим или иным калибровочным данным. Потери на нагрев и расплавление порошка могут изменять фактическую долю энергии, переданную основанию.

Первая ступень расчета дает сопоставимые энергетические показатели без попытки непосредственно предсказать микротвердость. На второй ступени предлагается решить нестационарную задачу теплопроводности на цилиндре с распределенным движущимся источником, температурно-зависимыми свойствами, скрытой теплотой плавления и последовательным наложением валиков. Для надежного прогноза зоны термического влияния требуются экспериментально идентифицированные параметры источника и проверка расчетных изотерм по металлографическим сечениям.

Понятие «погонная энергия» должно быть определено вместе со скоростью движения пятна относительно поверхности. Если вал вращается с угловой скоростью ω , а горелка одновременно перемещается вдоль оси со скоростью v_a , полная скорость теплового пятна по винтовой траектории не равна только осевой подаче. Игнорирование окружной составляющей приводит к систематической ошибке при сопоставлении режимов разной частоты вращения.

Результаты

Номинальная погонная энергия рассчитывается через ток I , напряжение U и скорость перемещения пятна v . Размерность $B \cdot A / (\text{мм/с})$ эквивалентна Дж/мм. Для оценки полезной энергии вводится коэффициент η , характеризующий долю электрической мощности, усвоенную расчетной тепловой системой. Он не является неизменной физической константой для всех установок РТА.

$$q = U \cdot \frac{I}{v}; \quad q_e = \eta \cdot U \cdot \frac{I}{v}, \quad (1)$$

где q и q_e – номинальная и эффективная погонная энергия, Дж/мм;

I – ток, А;

U – напряжение, В;

v – скорость вдоль траектории, мм/с;

η – коэффициент передачи энергии.

$$v = \sqrt{(\omega \cdot r)^2 + v_a^2}, \quad (2)$$

Выражение справедливо для винтовой траектории на поверхности радиуса r при согласованных единицах; ω задается в радианах в секунду.

$$\rho \cdot c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) + Q(x, y, z, t), \quad (3)$$

где T – температура;

ρ – плотность;

c – удельная теплоемкость;

k – теплопроводность;

Q – объемная мощность источника.

При фазовых превращениях требуется дополнение энтальпийной составляющей.

Для демонстрации метода использованы три режима с напряжением дуги 28 В: минимальный нагрев ($I = 100$ А; $v = 4,0$ мм/с), промежуточный ($I = 130$ А; $v = 3,5$ мм/с) и повышенный ($I = 160$ А; $v = 3,0$ мм/с). Такие значения не заявляются как рекомендации для конкретного порошка. Расчет проводится при одинаковой $\eta = 0,65$; при этом погонная энергия возрастает как за счет увеличения силы тока, так и вследствие уменьшения скорости движения.

Поскольку доля наплавленного порошка, реально попадающего в ванну, не фиксирована, удельная энергия на единицу массы осажденного материала в данном расчете не определяется. Для сравнения толщины слоя необходимо дополнительно задать расход порошка и коэффициент его использования. Без этих величин недопустимо напрямую переводить рассчитанные Дж/мм в миллиметры толщины или проценты разбавления (табл. 1). Таблица 1 – Расчетные значения при $U = 28$ В и $\eta = 0,65$

Режим	I , А	v , мм/с	q , Дж/мм	q_e , Дж/мм
А – низкая	100	4	700	455
В – средняя	130	3,5	1040	676
С – высокая	160	3	1493	971

Сопоставление показывает, что режим С сообщает поверхности более чем вдвое большую номинальную энергию на миллиметр, чем режим А. Такая разница заведомо значима для теплового воздействия, но абсолютная температура поверхности зависит от пространственного распределения источника, теплопроводности, потерь и геометрии. При большой энергии также возрастает роль повторного нагрева соседними проходами. Следовательно, критерий оптимизации должен учитывать не только номинальную энергию, но и допустимый диапазон проплавления.

Приближенный анализ основан на классическом решении задачи о движущемся тепловом источнике в однородном теле, предложенном Д. Розенталем [1]. Для оценки в точке на расстоянии R от источника применено стационарное трехмерное решение в упрощенной записи. Оно учитывает рассеяние тепла в бесконечной среде и перенос вследствие движения

источника, но не учитывает кривизну вала, теплофизические изменения при плавлении, объемное распределение энергии дуги и теплообмен с порошковыми частицами.

Показательное вычисление сделано для точки на расстоянии $R = 5$ мм от условного центра источника при координате $x = 0$. Приняты постоянные справочные для иллюстрации значения теплопроводности $k = 35$ Вт/(м·К) и температуропроводности $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Эти параметры нельзя считать универсальными характеристиками реальной подложки во всем температурном диапазоне. Полученные при таком подходе превышения температуры служат только мерой чувствительности к режиму, а не расчетом границы расплавления или действительной температуры поверхности.

Особенно важно, что аналитическая формула описывает точечный источник и дает недостоверные значения вблизи $R = 0$. На практике тепловое пятно обладает конечным размером, а распределение энергии может быть аппроксимировано гауссовой поверхностной или объемной функцией. Для цилиндрического вала предпочтительно калибровать распределение по поперечному сечению и по времени существования жидкой ванны. Прямое использование аналитических температур для прогноза размеров ванны без калибровки не обосновано.

В полном численном расчете решается уравнение сохранения тепловой энергии с температурно-зависимыми плотностью, теплоемкостью и теплопроводностью. Скрытую теплоту плавления удобно учитывать через эффективную теплоемкость или энтальпийную постановку. На поверхности задаются движущийся тепловой поток, конвективный и радиационный теплообмен, а на торцах – соответствующие граничные условия. Дискретизация должна обеспечивать сходимость по времени и по размеру элементов сетки в зоне наплавки.

$$\Delta T = \left(\eta \cdot U \cdot \frac{I}{2\pi \cdot k \cdot R} \right) \cdot \exp\left(-v \cdot \frac{R+x}{2\alpha}\right), \quad (4)$$

При $x = 0$, $R = 0,005$ м и указанных выше условных параметрах формула дает лишь сравнительную оценку превышения температуры; для абсолютной температуры требуется прибавить начальную температуру тела (табл. 2).

Таблица 2 – Расчет значений в разных режимах

Режим	ΔT , К (иллюстрация)	Отношение к А
А	545	1,00
В	814	1,49
С	1151	2,11

Расчетные величины являются результатом идеализированного аналитического выражения и могут превышать реальные температуры или не отражать режим плавления. Для количественного технологического прогноза следует использовать калиброванную распределенную модель.

Обсуждение

В режиме А относительно низкая погонная энергия может ограничивать ширину и глубину жидкой ванны. При недостаточном сплавлении с основанием возникают непровары и неравномерная геометрия валика, даже если первично затвердевший металл имеет мелкодисперсную структуру. Высокая локальная скорость охлаждения часто способствует уменьшению дендритного шага, однако эта качественная закономерность не гарантирует отсутствие трещин или требуемую адгезию. Для выбранного порошка необходимо оценивать его способность к растеканию и смачиваемость основного металла.

Промежуточный режим В представляется кандидатом для дальнейшей проверки при условии формирования устойчивой ванны и удовлетворительной геометрии валика. Это не означает, что он оптимален без эксперимента: необходима проверка минимального допустимого проплавления, межваликового сплавления, пористости и допуска на деформацию вала. Критерий отбора должен включать несколько характеристик одновременно, поскольку отдельный максимум твердости не исключает образования хрупких фаз или дефектов.

В режиме С повышенный тепловой ввод, вероятно, увеличит размеры ванны, время пребывания в высокотемпературной области и вклад основного металла в химический состав слоя. В никелевых системах разбавление железом способно изменить фазовый состав и распределение боридов и карбидов; направление изменения твердости зависит от реального химического состава. Опубликованные исследования РТА-покрытий отмечают зависимость микроструктуры и твердости от тока, скорости подачи порошка и состава присадки, включая возможность потери твердости при избыточном разбавлении [3-5].

Для оценки свойств следует различать верхнюю рабочую поверхность, середину слоя, зону сплавления и металл основы. Даже при близкой средней твердости профили по глубине могут значительно различаться. При наличии карбидной фазы ее распределение по сечению важно не меньше суммарного содержания: локальные скопления частиц выступают источниками неоднородности изнашивания и остаточных напряжений. Результаты работ с WC-содержащими РТА-слоями подтверждают существенную роль морфологии и распределения упрочняющей фазы [6].

Размер зерен и междендритное расстояние, фазовые превращения, пористость и остаточные напряжения не определяются непосредственно величиной $U \cdot I/v$. Они зависят от скорости охлаждения в конкретном температурном интервале, состава расплава, конвективного движения в ванне и последующей термической истории. Поэтому приведенная схема формулирует направленные гипотезы, которые должны проверяться металлографией, микротвердостью и испытаниями на износ.

Экспериментальная проверка может включать наплавку не менее трех независимых валов или образцов для каждого режима при постоянном расходе порошка, составе защитного газа, расстоянии до поверхности и шаге винтовой траектории. Сечение слоя желательно изучать в нескольких позициях вдоль каждого образца, а статистической единицей считать независимый образец, не отдельные точки измерения. Такой план позволит оценить межобразцовую вариабельность, которая не отражается многочисленными замерами на одном шлифе.

Из геометрических величин регистрируются высота усиления, ширина валика, глубина проплавления, площадь переплавленного основания и площадь наплавленного металла. Разбавление можно определять по отношению площади расплавленного основного металла к сумме площадей расплавленного основного и присадочного металла на поперечном шлифе. Такая геометрическая оценка применима при корректно выделенной границе и должна подтверждаться элементным картированием, особенно при неоднородном перемешивании.

Для анализа структуры применимы оптическая и электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ и рентгеновская дифракция. Микротвердость определяют по поперечному профилю с фиксированными нагрузкой, выдержкой и шагом измерений; результат представляют с доверительным интервалом по независимым образцам. Износостойкость желательно исследовать при заданных нагрузке, контртеле, скорости и пути трения с расчетом потери объема, поскольку сравнение только массовой убыли может смешивать эффект износа и плотности материалов.

При статистическом анализе влияние режима на количественные показатели допустимо оценивать однофакторной моделью с проверкой остатков и равенства дисперсий; при нарушении предпосылок уместны робастные методы или непараметрические тесты. Для совместной оценки тока и скорости нужен факторный эксперимент: три режима с одновременным изменением обоих факторов позволяют обнаружить различие общего тепловложения, но не позволяют отдельно определить вклад тока и скорости. Этот методический предел следует указывать при интерпретации рассчитанной таблицы.

Калибровку тепловой модели проводят не по одной максимальной температуре, а по комбинации термограмм, геометрии ванны и положения границ структурных зон. Для вала следует измерять также биение и остаточную деформацию после остывания. В противном случае технологический режим с высоким качеством слоя может оказаться неприемлемым из-

за ухудшения точности детали. Результаты калибровки должны проверяться на независимом режиме, не использованном при настройке параметров модели.

$$D = \frac{A_s}{A_s + A_p} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где D – геометрический коэффициент разбавления;

A_s – площадь переплавленного металла основания;

A_p – площадь наплавленного металла выше первоначальной поверхности.

Приведенный пример сознательно сохраняет инженерные параметры контролируемыми, но упрощенными. Постоянство η , k и α облегчает сопоставление режимов, однако реальная наплавка представляет собой связанную задачу течения металла, теплопереноса, фазовых превращений и взаимодействия порошка с плазмой. Современные трехмерные модели РТА рассматривают многофазные потоки и распределение частиц, что дает более содержательное описание ванны, чем одна скалярная погонная энергия [7].

Если требуется выбрать рабочий режим для конкретного вала, расчет следует дополнять данными о тепловом расширении, закреплении детали, предельной температуре подшипниковых посадок и требованиях к последующей механической обработке. Особенно важно влияние многослойной наплавки: эффективный тепловой цикл второго слоя отличается от первого. Модель также должна учитывать межпроходную температуру; без нее сравнение режимов может быть воспроизводимым только для одиночного валика.

Интерпретация публикаций ограничена неодинаковыми составами порошков и материалов основания. Например, тенденция изменения твердости покрытий Ni-Cr-Si-B при увеличении тока не может без дополнительной проверки переноситься на кобальтовые покрытия либо композиции с крупными частицами карбида вольфрама. Литературные наблюдения служат обоснованием диапазона проверяемых гипотез, а не независимым подтверждением ожидаемых численных результатов для рассмотренного вала.

Заключение

Предложена расчетно-методическая схема сопоставления плазменно-порошковой наплавки цилиндрического вала, связывающая ток, напряжение и скорость движения источника с номинальной и эффективной погонной энергией. Для трех демонстрационных режимов получены значения 700, 1040 и 1493 Дж/мм; при условной эффективности 0,65 соответствующие значения составляют 455, 676 и 971 Дж/мм. Эти величины являются результатом арифметического расчета, но не характеристиками экспериментально наплавленных образцов.

Физический анализ указывает на противоречивые эффекты увеличения погонной энергии: улучшение условий сплавления с основой может сопровождаться усилением разбавления и теплового влияния на вал. Ожидаемые изменения твердости, микроструктуры и износостойкости нельзя однозначно вывести из энергии без знания состава и термической истории наплавленного материала. Промежуточный режим рассматривается как кандидат для испытаний, но не объявляется оптимальным до выполнения металлографии и трибологических измерений.

Практическая ценность методики состоит в определении минимального набора данных для дальнейшей калибровки нестационарной модели: геометрия валика, температурный цикл, глубина проплавления, разбавление, профиль микротвердости, пористость и износ. Только после независимой верификации модели допустим количественный прогноз эксплуатационных характеристик наплавленного слоя.

Литература

1. Rosenthal D. The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments // Transactions of the ASME. 1946. Vol. 68, № 8. PP. 849-865.
2. Hirpara K.P., Valaki J.B., Chaudhari M.D., Siddhpura M.A. A comprehensive review on recent developments in materials and technological parameters for plasma transferred arc hardfacing process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2024. Vol. 238, № 3. PP. 1507-1519.

3. Effect of powder composition, PTAW parameters on dilution, microstructure and hardness of Ni-Cr-Si-B alloy deposition: Experimental investigation and prediction using machine learning technique // Heliyon. 2024. Vol. 10, № 16. Art. e36087.
4. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration // Surface and Coatings Technology. 2004. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897204001446> (дата обращения: 21.10.2026).
5. Comparison of microstructure, dilution and wear behavior of Stellite 21 hardfacing on H13 steel using cold metal transfer and plasma transferred arc welding processes // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 375. PP. 383-394.
6. Lee K.-j., Kim D. Effect of Tungsten Carbide Morphology, Quantity, and Microstructure on Wear of a Hardfacing Layer Manufactured by Plasma Transferred Arc Welding // Metals. 2021. Vol. 11, № 12. Art. 2035.
7. Modeling of multi-phase flow in plasma transferred arc cladding of NiCrBSi/WC metal matrix composite // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 232. Art. 125944.
8. Neupane G., Özdemir O.Ç., Taslim M. E. Computational Modeling of Plasma Transferred Arc–Substrate Heat Transfer in AISI 1018 for Additive Manufacturing // Journal of Materials Engineering and Performance. 2026.