

УДК 62-5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

Научный обзор



Порошковая лазерная наплавка как элемент системы машиностроения индустрии 4.0

А.А. Вознесенская, Р.В. Чкалов, А.В. Киреев, А.С. Разносчиков, Д.А. Кочуев

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрена проблема подачи порошкового материала для систем лазерной наплавки в соответствии с требованиями цифровизации современного производства, представлен обзор существующих конструкций, их преимущества и недостатки. Целью обзора было по имеющимся литературным данным представить концепцию системы подачи порошка, повышающую общую технологичность, контроль и автоматизацию процесса наплавки. Рассмотрены основные проблемы систем подачи порошкового материала, приводящие к определенным технологическим трудностям современного производства и повышающие долю последующей механической обработки в технологическом процессе, а также пути решения проблем порошковой подачи материала в зону лазерной наплавки. Представлены ключевые аспекты, связанные с работой систем подачи порошкового материала, приводятся рекомендации для проектирования оптимальной системы подачи порошкового материала в зону лазерного воздействия, приближающей технологию порошковой наплавки к системам, соответствующим индустрии 4.0. На основе обзора предложена концепция системы подачи порошка, повышающая общую технологичность, контроль и автоматизацию процесса наплавки. Цифровизация процесса достигается за счет использования системы датчиков и снижения инерционности процесса подачи порошкового материала путем оптимизации конструкции подающего механизма и места расположения дозирующего узла в системе порошковой лазерной наплавки.

Ключевые слова: аддитивные технологии; порошковый материал; система подачи порошкового материала; лазерная наплавка, градиентные материалы.

Как цитировать

Вознесенская А.А., Чкалов Р.В., Киреев А.В., Разносчиков А.С., Кочуев Д.А. Порошковая лазерная наплавка как элемент системы машиностроения индустрии 4.0 // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 97–106. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

Review

Powder laser cladding as a component of Industry 4.0 machine building systems

Anna A. Voznesenskaya, Ruslan V. Chkalov, Andrey V. Kireev,
Artem S. Raznoschikov, Dmitriy A. Kochuev

Vladimir State University, Vladimir, Russia

ABSTRACT

This article examines the problem of feeding powder material to laser cladding systems based on state-of-the-art industrial digital transformation standards and presents an overview of existing designs, their advantages and disadvantages. Based on the review, to propose a powder feed system concept that improves the overall cladding performance, control, and automation. The article reviews the main issues related to powder feed system that lead to certain process difficulties in the contemporary industry and increase the amount of subsequent machining in the process. The article reviews approaches to solving the problems of powder feeding to the laser cladding area. The article discusses key aspects related to powder feed systems and provides advice on designing an improved system to feed powder to the laser impact area, bringing powder cladding technology closer to Industry 4.0 systems. Based on the review, the authors propose a powder feed system concept that improves the overall cladding performance, control and automation. Digital process transformation is achieved by the use of a sensor system and reduced inertia of the powder feed process by improving the feed system design and the dosing unit location in the laser cladding powder system.

Keywords: additive technologies; powder material; powder supply system; laser cladding; functionally graded materials.

To cite this article

Voznesenskaya AA, Chkalov RV, Kireev AV, Raznoschikov AS, Kochuev DA. Powder laser cladding as a component of Industry 4.0 machine building systems. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):97–106. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Концепция индустрии четвертой промышленной революции предполагает глубокую информатизацию производственных процессов. Бурно развивающаяся отрасль аддитивного производства, в частности прямой лазерной порошковой наплавки, предполагает автоматизацию и информатизацию процесса получения деталей [1, 2]. Стремительно развивающееся направление наплавки и 3D-печати изменило подход не только к построению конструктивных элементов и узлов, но и к получению материалов, обладающих заданными свойствами. Для достижения требуемых свойств наплавляемых слоев используются лазерные методы обработки [3–6]. Использование лазерного излучения (ЛИ) превосходит иные методы подвода энергии в зону обработки ввиду высокой когерентности, направленности, высокой плотности энергии лазерного излучения, высокой локальности и прогнозирования воздействия, низкой зоны термического влияния (ЗТВ). Лазерная наплавка используется в различных отраслях промышленности: металлургической, аэрокосмической, горнодобывающей, автомобильной, судостроительной. Процесс лазерной наплавки с использованием порошкового материала является эффективным методом ремонта, восстановления, функционализации поверхностей, создания новых деталей. В современном технологическом исполнении спектр применяемых материалов очень широк. Путем использования нескольких систем подачи возможно получение сложных структур, обеспечивающих значительное расширение технологичности производства.

Получение градиентных материалов осуществимо благодаря таким преимуществам, как смешивания двух или более типов порошков, контроль скорости подачи каждого потока порошка и гибкость в управлении другими рабочими параметрами [6–10]. Мощность источника лазерного излучения, скорость обработки и скорость подачи порошка оказывают значительное влияние на качество наплавочного слоя [11]. Эти параметры предоставляют наиболее широкие возможности для изменения и улучшения свойств наносимого слоя [12]. Если параметры процесса не соответствуют требованиям, в наносимых слоях могут появиться дефекты, такие как поры и трещины. Таким образом, для достижения желаемых результатов необходимо эффективно контролировать параметры процесса [13–15]. Прогнозирование свойств материала возможно как посредством изменения параметров лазерного излучения в процессе лазерной порошковой наплавки, так и путем использования разных материалов, что представлено на рис. 1 в виде схемы.

Подачу порошка в зону лазерного воздействия для прямого лазерного выращивания можно разделить на три отдельных этапа: дозирование порошка, транспортировка порошка и доставка порошка непосредственно в зону лазерного воздействия.

Первый этап дозирования порошка включает измерение нужного количества порошка из системы подачи порошка в ванну расплава. Второй этап включает транспортировку порошка из системы подачи в сопло, что осуществляется инертным газом-носителем. Третий этап осуществляется с помощью сопла непосредственно в зону

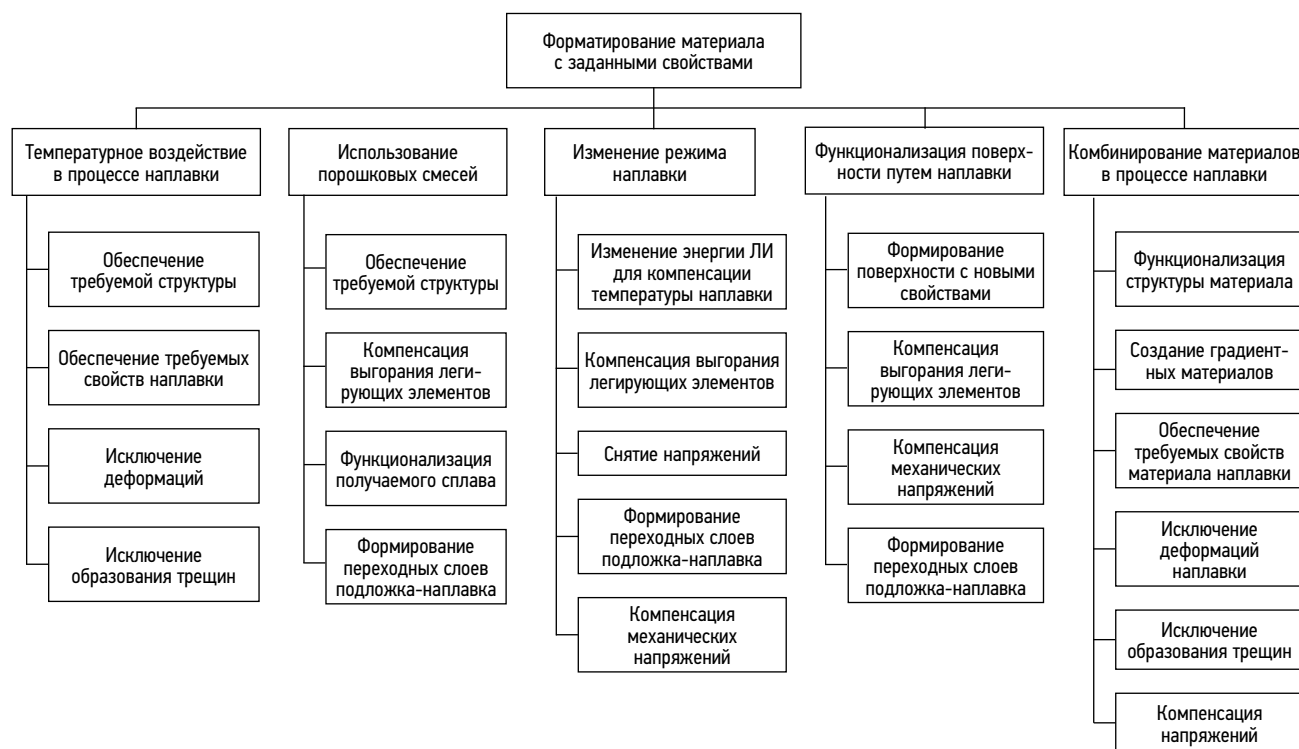


Рис. 1. Схема формирования свойств материала в процессе лазерной порошковой наплавки. ЛИ — лазерное излучение.

Fig. 1. Development of material properties during laser powder cladding. ЛИ, laser emitted light.

лазерного воздействия. Важно отметить, что проводится четкое различие между дозированием порошка, транспортировкой и доставкой, и они зависят от конструкции используемого оборудования [16, 17].

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для дозирования и транспортировки порошковых материалов можно использовать разные способы подачи. Каждый из этих способов реализуется в виде разных конструкций. В данной работе представлен обзор существующих решений, концепция подающего устройства, преимущества и недостатки по сравнению с системами, использующими протяженные подающие магистрали.

В работе [18] выявили влияние взаимодействия между распределением порошка и расплавом на геометрию наносимого слоя. Авторы [19] устранили явление избыточного давления и получили более однородную геометрию наплавленного слоя, мгновенно отрегулировав расход порошка на выходе из сопла. В работе [20] представлена система управления, основанная на мгновенном регулировании потока порошка. Преимуществом данной системы является то, что поток порошка можно остановить, когда наплавка материала не осуществляется. Следовательно, количество лишнего порошка уменьшается, и это делает процесс лазерного послыоного нанесения более экономичным и бездефектным.

Один из видов винтовой подачи порошка, разработанный авторами [21], включает в себя осевой вибрационный шнек, способствующий процессу транспортировки. Другая конструкция, из работы [22], состоит из приводимого в действие двигателем шнека, который проталкивает определенное количество порошка (функция скорости вращения шнека) в газовую камеру. Поток инертного газа подхватывает дозированный порошок из газовой камеры и переносит его к соплу подачи.

Авторы [23] предложили комбинацию осевой и радиальной вибрации для транспортировки мелкозернистого материала. Во время прямого хода цикла вибрации материал проталкивается вперед. Однако при обратном ходе радиальная вибрация поднимает частицы порошка с поверхности, тем самым достигая транспортировки материала в одном направлении.

ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ ПОДАЧИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Использование порошковых материалов в аддитивном производстве позволяет с высокой точностью воспроизводить формируемый контур, соответствующий требуемому, с учетом некоторых ограничений: ширина и высота формируемого валика определяются параметрами оптической головки, подающего сопла; время, необходимое для начала наплавки и окончания операции

обработки заданного сегмента поверхности, определяется конфигурацией системы подачи порошкового материала.

Конфигурация системы подачи порошкового материала является фактором, определяющим назначение наплавочного оборудования. Существуют системы подачи, расположенные за пределами зоны наплавки и размещаемые непосредственно на оптической головке. В обеих системах есть как преимущества, так и недостатки. Устройства подачи порошкового материала, вынесенные за пределы зоны наплавки, зачастую представляют собой достаточно габаритные установки. Большие габариты систем подачи порошкового материала позволяют иметь большой запас порошкового материала, размещать на таких установках системы подготовки газов, питания и управления данным оборудованием. Обслуживание данной системы также не вызывает трудностей ввиду свободного доступа к элементам и узлам подающего устройства. Недостатком является наличие протяженной порошковой транспортирующей магистрали. Протяженность транспортировочной порошковой магистрали накладывает ограничения на технологический процесс наплавки: время задержки от начала подачи порошкового материала до его выхода из сопла и стабилизации данного процесса; продувки магистрали для исключения засоров; также нередкими являются пульсации подачи и накопление значительного статического заряда. Величина задержки подачи порошкового материала определяется исходя из перемещения гранул порошкового материала от дозирующего узла до выхода из сопла. Время стабилизации порошкового потока до номинального уровня, установленного в системе управления податчиком порошкового материала при длине магистрали от 5 до 10 м, составляет 4–15 с. Скорость газового потока в зависимости от режима наплавки составляет от 4 до 15 м/с. Стабилизация подачи порошкового материала сильно зависит от протяженности магистрали и имеет некоторый нелинейный характер. Увеличение протяженности магистрали, в том числе перегибы, жесткость крепления приводят к изменению времени стабилизации порошкового потока (снижение пульсаций). Данная величина, помимо особенностей порошковой магистрали, зависит также и от пикнометрических характеристик используемой порошковой смеси. Смеси, содержащие гранулы оксидной формы, перемещаются по порошковой магистрали лучше, нежели частицы, имеющие осколючатую форму. Форма частиц порошка в какой-то степени является определяющим фактором величины задержки на подачу порошкового материала и последующей продувки [23]. Продувка магистрали необходима для исключения накопления порошка в магистрали. Наличие порошка в магистрали при последующем акте подачи приводит к закупориванию подающего рукава, последующему демонтажу и чистке. Совокупность этих факторов приводит к усложнению использования технологии лазерной наплавки — от дополнительных издержек, связанных

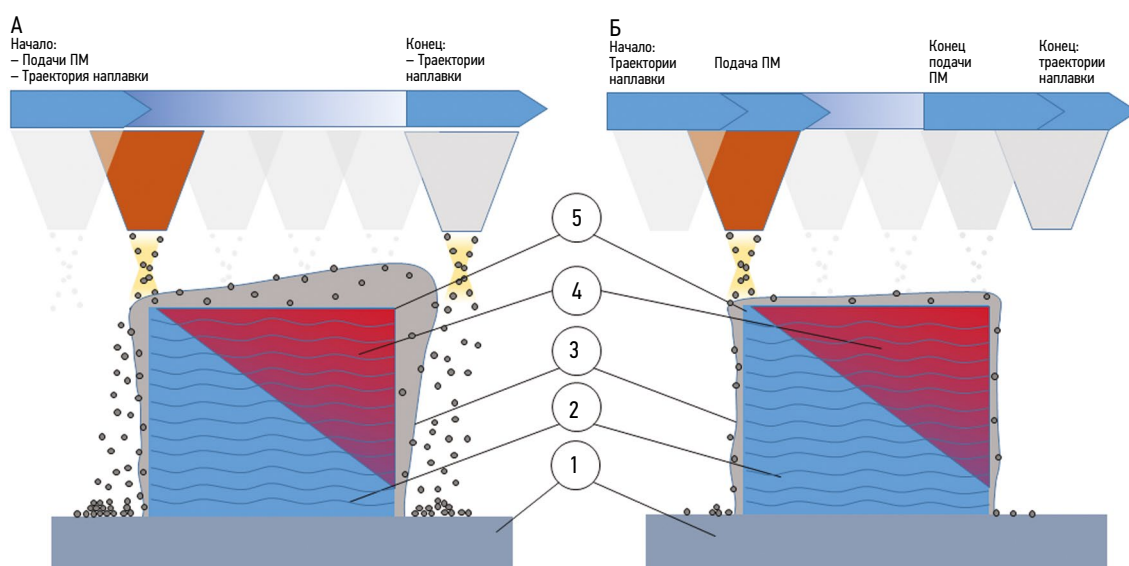


Рис. 2. Подача порошкового материала в процессе лазерной наплавки: А — непрерывная; Б — дифференцированная (безынерционная) подача порошка в процессе лазерной наплавки, где 1 — обрабатываемая (подогреваемая) подложка, 2 — наплавляемая структура (на горячую подложку), 3 — материал наплавки, подверженный последующему удалению, 4 — рост начальной температуры каждого последующего слоя до температуры, вызывающей налипание гранул порошкового материала, 5 — контур предполагаемой наплавляемой структуры. ПМ — порошковый материал.

Fig. 2. Powder feeding during laser cladding: A, continuous feeding; B, differentiated (instantaneous) powder feeding during laser cladding, where 1 is the processed (heated) substrate, 2 is the deposited structure (onto hot substrate), 3 is the deposited material to be removed, 4 is the increase of the initial temperature of each subsequent layer to the temperature of adhesion of powder granules, 5 is the outline of the proposed deposited structure.

с последующей механической обработкой, до образования дефектов в виде пор, трещин, несплавлений, шлаковых включений. Обозначенные дефекты наблюдаются при нарушении режима наплавки, несоответствии подводимой в зону воздействия энергии количеству поданного порошкового материала.

Данные особенности не оказывают негативного влияния на технологический процесс, для которого характерна непрерывная длительная подача порошкового материала в зону обработки. При использовании систем подачи порошка, вынесенных за пределы наплавочной головки, при необходимости обработки с периодическими сменами участков лазерной наплавки на предварительно нагретые поверхности (рис. 2), характерно формируют большие участки паразитного материала, свойства которого отличаются от требуемого при наплавке. Данные наплывы вызваны разогревом поверхности и налипанием гранул порошкового материала, иногда с частичным оплавлением.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Концепция системы подачи порошкового материала, отвечающая требованиям четвертой технологической революции, должна обладать набором датчиков, осуществляющих контроль настоящего состояния. Основными параметрами контроля являются: давление в транспортировочной магистрали; наличие порошка в магистрали; расход порошкового материала; наполненность бункера;

наличие алгоритмов управления, учитывающих инерционность подачи порошкового материала от дозирующего узла до зоны наплавки. На рис. 3 представлен алгоритм работы устройства подачи порошкового материала в зону обработки. Блок «управляющий сигнал» предполагает получение цифрового/аналогового сигнала о начале или завершении операции технологического цикла. Ввод параметров работы устройства возможно осуществлять по протоколу Modbus ASCII/Modbus TCP, записи соответствующих параметров в память устройства. Помимо управляющих параметров, возможен ввод контролируемых параметров, таких как заполнение бункера, давление транспортировочного газа в магистрали, расход порошкового материала, существует возможность задавать состояния системы для получения предупреждений. Состояния устройства в процессе работы (блок алгоритма «вывод/запись информации состояния») сохраняются в памяти в виде семплов, ограниченных по объему данных, имеющих привязку ко времени. Доступ возможен путем физического извлечения модуля памяти или обращения по протоколу Modbus. Приоритет выполнения операции установлен по внешнему сигналу. Помимо выполнения операции, возможен запрос изменения состояния данных (уровня контролируемых параметров датчиков).

Необходимым условием цифрового производства является система обмена данными между всеми элементами комплекса наплавки. Данный перечень свойств позволит в значительной степени оцифровать производственный

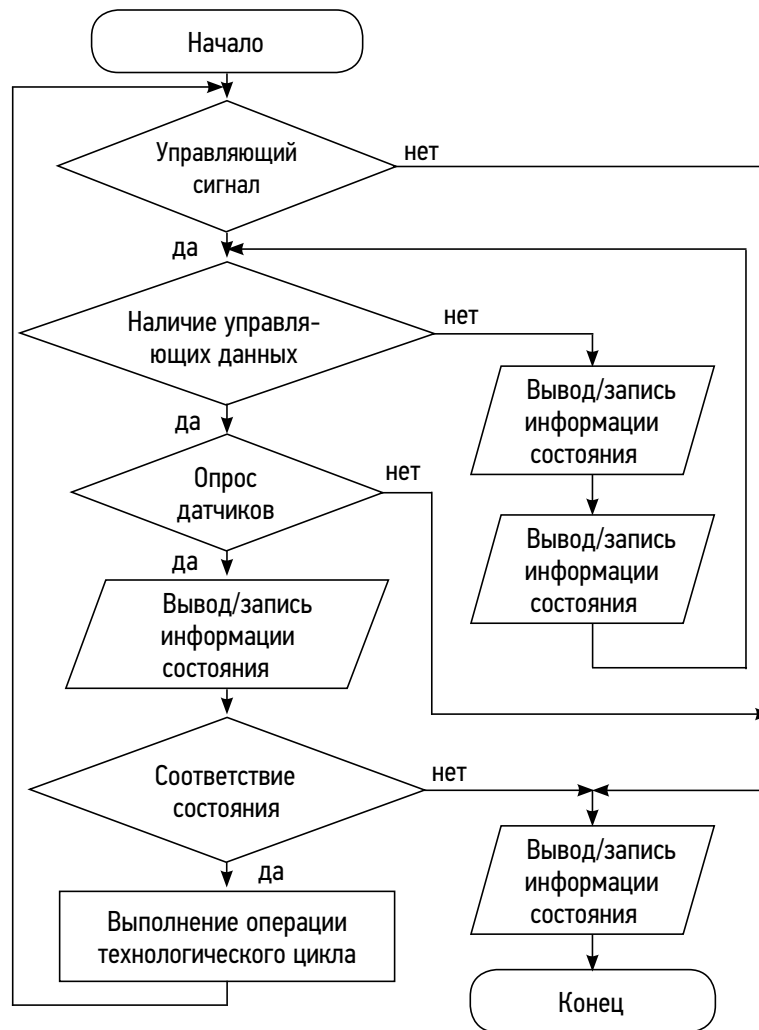


Рис. 3. Алгоритм управления системой подачи порошка.
Fig. 3. Powder feeding system control algorithm.

процесс. Подавляющее большинство систем подачи порошкового материала имеют некоторые свойства из приведенного перечня. Наиболее эффективными с точки зрения инерционности процесса подачи являются решения с дозирующим блоком, расположенным непосредственно на наплавной головке. Дозирующий узел устройства подачи порошкового материала должен представлять собой компактное решение, имеющее минимальную массу (рис. 4).

Для систем порошковой наплавки требование к массе последнего звена используемых роботизированных манипуляторов является определяющим используемое навесное оборудование. Уменьшение общих габаритов системы подачи порошкового материала для размещения на наплавочной головке реализуется путем отказа от рудиментных технологических решений, а именно использования универсальных промышленных контроллеров, номенклатуры блоков питания, преобразователей сигналов, использования стандартных технологических решений построения шкафов автоматики, габаритных, металлоемких корпусов, что влечет ограничения объема

бункера порошкового материала. Данное ограничение эффективно масштабируется за счет применения каскадных систем подачи: наполнение дозирующего узла, расположенного на наплавочной головке, по мере необходимости осуществляется из внешнего подающего устройства, расположенного за пределами области обработки. Каскадная система подачи справедлива как для стационарных систем, так и для мобильных. При использовании ручных систем порошковой лазерной наплавки протяженная порошковая магистраль приводит к значительному увеличению трудоемкости, связанной с ожиданием стабилизации порошкового потока, производственным издержкам, связанным с холостым расходом порошков [24]. Издержки выражаются в увеличении времени техпроцесса, перерасходе порошкового материала, повышении трудоемкости операции ручной наплавки. Размещение дозирующего блока непосредственно у сопла наплавочной головки позволяет корректировать режим подачи порошкового материала в зависимости от теплового состояния обрабатываемой поверхности, от обрабатываемой геометрии. Получать воспроизводимый результат наплавки

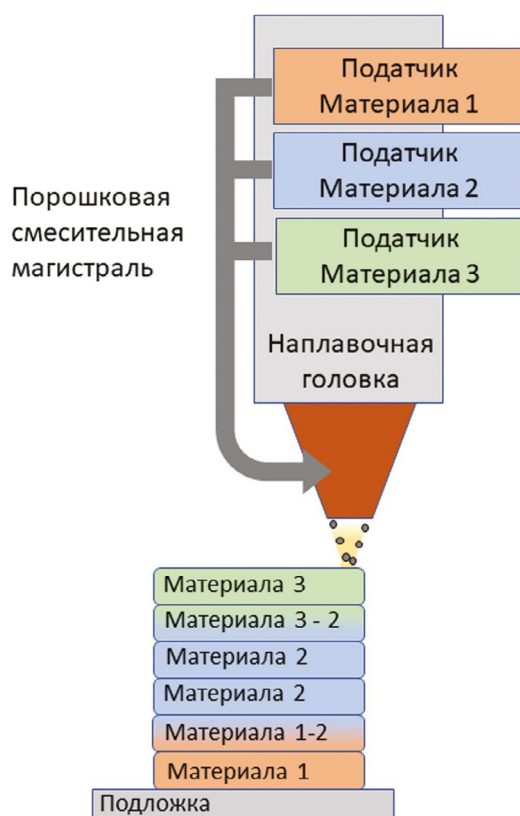


Рис. 4. Компонувочное решение размещения дозирующего узла на наплавочной головке.
Fig. 4. Layout arrangement of the dosing unit on the cladding head.

возможно только при условии наличия информационной системы обмена данными, анализа данных, управления устройствами, входящими в единую информационную систему, с полным исключением случайных факторов в технологическом процессе. Результатом реализации данной концепции является значительное снижение инерционности системы, снижение общих габаритов и расширение общего функционала, повышение эффективности использования материальных, технологических и временных ресурсов предприятия.

Представленная концепция может быть применима для получения градиентных структур и структур разнородных материалов. Это достигается за счет использования нескольких подающих устройств, порошковые магистрали которых объединяются в сопловой части наплавочной головки, вносящей порошок материал в зону воздействия лазерного луча. Организация методов комбинации нескольких устройств подачи порошковых материалов в одном технологическом процессе требует наличия в информационной системе алгоритмов: взаимодействия систем подачи; отношения их смешивания; совокупного влияния газовых потоков, инерционной составляющей системы перемещения подачи; контроля тепловых и гидродинамических процессов, протекающих непосредственно в зоне наплавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование любой технологии требует глубокого понимания участвующих в ней процессов. Повышение эффективности каждого из процессов приблизит технологии к полной автоматизации и цифровизации производств. На основе анализа существующих устройств для доставки порошковых материалов в зону лазерного воздействия, а также с учетом проблемных моментов этих устройств сформировано понимание оптимальной системы подачи порошкового материала, которая удовлетворила бы потребности промышленности в рамках индустрии 4.0. Основой для построения технологических установок, соответствующих требованиям четвертой технологической революции, должны стать: обмен данными всех систем, осуществляющих непосредственное влияние на процесс наплавки; прогнозируемый ресурс элементов дозирующего узла и запаса порошкового материала; анализ расхода газов, порошкового материала и теплового состояния обрабатываемой поверхности; коррекция технологического режима в процессе наплавки согласно алгоритмам коррекции; исключение человеческого фактора из технологического процесса обработки; ведение цифровой истории обработки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.А. Вознесенская — разработка концепции; Д.А. Кочуев — научное руководство; Р.В. Чкалов — программно-аппаратная разработка; А.В. Киреев — технологическое сопровождение; А.С. Разносчиков — разработка конструкции.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: A.A. Voznesenskaya, concept development; D.A. Kochuev, scientific management; R.V. Chkalov, software and hardware development; A.V. Kireev, technological support; A.S. Raznoschikov, design development.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Systems engineering in the fourth industrial revolution: Big data, novel technologies, and modern systems engineering / R.S. Kenett, R.S. Swarz, A. Zonnenshain, editors. John Wiley and Sons, 2019. 611 p. doi: 10.1002/9781119513957
2. Wang H., Liu W., Tang Z., et al. Review on adaptive control of laser-directed energy deposition // *Opt Eng.* 2020. Vol. 59, N 7. ID 070901. doi: 10.1117/1.OE.59.7.070901
3. Kladosasilakis N., Charalampous P., Kostavelis I., et al. Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: A comprehensive review // *Prog Addit Manuf.* 2021. Vol. 6. P. 349–365. doi: 10.1007/s40964-021-00180-8
4. Ghanavati R., Lannunziata E., Norouzi E., et al. Design and development of SS316L-IN718 functionally graded materials via laser powder bed fusion // *Mater Lett.* 2023. Vol. 349. ID 134793. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134793
5. Parihar R.S., Setti S.G., Sahu R.K. Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review // *Sci Eng Compos Mater.* 2018. Vol. 25, N 2. P. 309–336. doi: 10.1515/secm-2015-0395
6. Voznesenskaya A.A., Raznoschikov A.S., Galkin A.F., et al. Distribution of laser radiation in opaque porous media // *J Phys Conf Ser.* 2022. Vol. 2316, N 1. ID 012018. doi: 10.1088/1742-6596/2316/1/012018
7. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Materialia.* 2016. Vol. 117. P. 371–392. doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
8. Demir A.G., Kim J., Caltanissetta F., et al. Enabling multi-material gradient structure in laser powder bed fusion // *J Mater Process Technol.* 2022. Vol. 301. ID 117439. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117439
9. Errico V., Posa P., Fusco A., et al. Intralayer multi-material structure stainless-steel/nickel-superalloy fabricated via laser-powder bed fusion process // *Manuf Lett.* 2023. Vol. 35. P. 11–15. doi: 10.1016/j.mfglet.2022.11.004
10. Chernikov A.S., Voznesenskaya A.A., Davydov N.N., et al. Gradient materials formation by laser cladding of powder compositions // *J Phys Conf Ser.* 2018. Vol. 1109, N 1. ID 012062. doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012062
11. Goodarzi D.M., Pekkarinen J., Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry // *Weld World.* 2017. Vol. 61. P. 883–891. doi: 10.1007/s40194-017-0495-0
12. Bax B., Rajput R., Kellet R., Reisacher M. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition // *Addit Manuf.* 2018. Vol. 21. P. 487–494. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.002
13. Janicki D. Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles // *Opt Laser Technol.* 2017. Vol. 94. P. 6–14. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.007
14. Fu F., Zhang Y., Chang G., Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors // *Optik.* 2016. Vol. 127, N 1. P. 200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043
15. Balu P., Leggett P., Hamid S., Kovacevic R. Multi-response optimization of laser-based powder deposition of multi-track single layer hastelloy C-276 // *Mater Manuf Process.* 2013. Vol. 28, N 2. P. 173–182. doi: 10.1080/10426914.2012.677908
16. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means—A perspective // *Particuology.* 2012. Vol. 10, N 4. P. 397–427. doi: 10.1016/j.partic.2012.06.002
17. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process // *Opt Lasers Eng.* 2004. Vol. 41, N 6. P. 849–867. doi: 10.1016/S0143-8166(03)00063-0
18. Arrizubieta J.I., Lamikiz A., Cortina M., et al. Hardness, grain size and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel // *Int J Mach Tools Manuf.* 2018. Vol. 135. P. 53–64. doi: 10.1016/j.ijmactools.2018.08.004

19. Tan H., Shang W., Zhang F., et al. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition // *J Mater Process Technol.* 2018. Vol. 254. P. 361–372. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.026

20. Arrizubieta J.I., Martínez S., Lamikiz A., et al. Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition // *J Manuf Process.* 2017. Vol. 29. P. 242–251. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.018

21. Jinping Q., Baoshan S., Yanhong F., Hezhi H. Dependence of solids conveying on screw axial vibration in single screw extruders // *J Appl Polym Sci.* 2006. Vol. 102, N 3. P. 2998–3007. doi: 10.1002/app.24658

22. Weerasinghe V.M. Laser cladding with pneumatic powder delivery. В кн.: *Applied laser tooling* / V.M. Weerasinghe, W.M. Steen, editors. Dordrecht: Springer Netherlands. 1987. P. 183–211. doi: 10.1007/978-94-009-3569-3

23. Winkler G. Analysing the vibrating conveyor // *Int J Mech Sci.* 1978. Vol. 20, N 9. P. 561–570. doi: 10.1016/0020-7403(78)90014-0

24. Soshi M., Yau C., Kusama R. Development and evaluation of a dynamic powder splitting system for the directed energy deposition (DED) process // *CIRP Annals.* 2020. Vol. 69, N 1. P. 341–344. doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.048

REFERENCES

1. Kenett RS, Swarz RS, Zonnenshain A, editors. *Systems engineering in the fourth industrial revolution: Big data, novel technologies, and modern systems engineering.* John Wiley and Sons; 2019. 611 p. doi: 10.1002/9781119513957

2. Wang H, Liu W, Tang Z, et al. Review on adaptive control of laser-directed energy deposition. *Opt Eng.* 2020;59(7):070901. doi: 10.1117/1.OE.59.7.070901

3. Kladovasilakis N, Charalampous P, Kostavelis I, et al. Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: A comprehensive review. *Prog Addit Manuf.* 2021;6:349–365. doi: 10.1007/s40964-021-00180-8

4. Ghanavati R, Lannunziata E, Norouzi E, et al. Design and development of SS316L-IN718 functionally graded materials via laser powder bed fusion. *Mater Lett.* 2023;349:134793. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134793

5. Parihar RS, Setti SG, Sahu RK. Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review. *Sci Eng Compos Mater.* 2018;25(2):309–336. doi: 10.1515/secm-2015-0395

6. Voznesenskaya AA, Raznoschikov AS, Galkin AF, et al. Distribution of laser radiation in opaque porous media. *J Phys Conf Ser.* 2022;2316(1):012018. doi: 10.1088/1742-6596/2316/1/012018

7. Herzog D, Seyda V, Wycisk E, Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia.* 2016;117:371–392. doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019

8. Demir AG, Kim J, Caltanissetta F, et al. Enabling multi-material gradient structure in laser powder bed fusion. *J Mater Process Technol.* 2022;301:117439. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117439

9. Errico V, Posa P, Fusco A, et al. Intralayer multi-material structure stainless-steel/nickel-superalloy fabricated via laser-powder bed fusion process. *Manuf Lett.* 2023;35:11–15. doi: 10.1016/j.mfglet.2022.11.004

10. Chernikov AS, Voznesenskaya AA, Davydov NN, et al. Gradient materials formation by laser cladding of powder compositions. *J Phys Conf Ser.* 2018;1109(1):012062. doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012062

11. Goodarzi DM, Pekkarinen J, Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. *Weld World.* 2017;61:883–891. doi: 10.1007/s40194-017-0495-0

12. Bax B, Rajput R, Kellet R, Reisacher M. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition. *Addit Manuf.* 2018;21:487–494. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.002

13. Janicki D. Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles. *Opt Laser Technol.* 2017;94:6–14. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.007

14. Fu F, Zhang Y, Chang G, Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors. *Optik.* 2016;127(1):200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043

15. Balu P, Leggett P, Hamid S, Kovacevic R. Multi-response optimization of laser-based powder deposition of multi-track single layer hastelloy C-276. *Mater Manuf Process.* 2013;28(2):173–182. doi: 10.1080/10426914.2012.677908

16. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means — A perspective. *Particuology.* 2012;10(4):397–427. doi: 10.1016/j.partic.2012.06.002

17. Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process. *Opt Lasers Eng.* 2004;41(6):849–867. doi: 10.1016/S0143-8166(03)00063-0

18. Arrizubieta JI, Lamikiz A, Cortina M, et al. Hardness, grain size and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel. *Int J Mach Tools Manuf.* 2018;135:53–64. doi: 10.1016/j.ijmactools.2018.08.004

19. Tan H, Shang W, Zhang F, et al. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition. *J Mater Process Technol.* 2018;254:361–372. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.026

20. Arrizubieta JI, Martínez S, Lamikiz A, et al. Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition. *J Manuf Process.* 2017;29:242–251. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.018

21. Jinping Q, Baoshan S, Yanhong F, Hezhi H. Dependence of solids conveying on screw axial vibration in single screw extruders. *J Appl Polym Sci.* 2006;102(3):2998–3007. doi: 10.1002/app.24658

22. Weerasinghe VM. Laser cladding with pneumatic powder delivery. In: Weerasinghe VM, Steen WM, editors. *Applied laser tooling.* Dordrecht: Springer Netherlands; 1987. P. 183–211. doi: 10.1007/978-94-009-3569-3

23. Winkler G. Analysing the vibrating conveyor. *Int J Mech Sci.* 1978;20(9):561–570. doi: 10.1016/0020-7403(78)90014-0

24. Soshi M, Yau C, Kusama R. Development and evaluation of a dynamic powder splitting system for the directed energy deposition (DED) process. *CIRP Annals.* 2020;69(1):341–344. doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.048

ОБ АВТОРАХ

***Анна Алексеевна Вознесенская**, ассистент;
адрес: Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87;
ORCID: 0000-0002-8739-5230; eLibrary SPIN: 6796-3190;
e-mail: 2obk@bk.ru

Руслан Владимирович Чкалов, младший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 6129-1620; ORCID: 0000-0003-2307-0901;
e-mail: j.larenax@gmail.com

Андрей Викторович Киреев, заведующий лабораториями;
eLibrary SPIN: 4936-2326;
e-mail: ariant-tp@mail.ru

Артём Сергеевич Разносчиков, ассистент;
eLibrary SPIN: 5834-7047;
e-mail: raznoschikoff.ar@yandex.ru

Дмитрий Андреевич Кочуев, канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер;
eLibrary SPIN: 3652-9748;
ORCID: 0000-0002-7103-5046;
e-mail: _b_@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Anna A. Voznesenskaya**, Assistant;
address: 87 Gorky st, Vladimir, 600000, Russia;
ORCID: 0000-0002-8739-5230; eLibrary SPIN: 6796-3190;
e-mail: 2obk@bk.ru

Ruslan V. Chkalov, Junior Researcher;
eLibrary SPIN: 6129-1620; ORCID: 0000-0003-2307-0901;
e-mail: j.larenax@gmail.com

Andrey V. Kireev, Head of Laboratories;
eLibrary SPIN: 4936-2326;
e-mail: ariant-tp@mail.ru

Artem S. Raznoschikov, Assistant;
eLibrary SPIN: 5834-7047;
e-mail: raznoschikoff.ar@yandex.ru

Dmitriy A. Kochuev, Lead engineer,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics);
eLibrary SPIN: 3652-9748; ORCID: 0000-0002-7103-5046;
e-mail: _b_@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author