

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Быковский Дмитрий Петрович

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ И  
МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ НАНЕСЕНИЕМ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (412) НИЯУ МИФИ

**Петровский Виктор Николаевич**

Официальные оппоненты:

**Овчинников Виктор Васильевич**  
профессор, доктор технических наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», факультет машиностроения, профессор кафедры материаловедения.

**Иванов Виктор Владимирович**  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор

Государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет), Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики, директор.

**Люхтер Александр Борисович**  
кандидат технических наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Научно-образовательный центр внедрения лазерных технологий, директор.

Защита состоится «23» декабря 2019 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета МИФИ.01.04



\_\_\_\_\_/Степаненко А.А./

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Эксплуатационные характеристики конструкций и деталей машин определяются свойствами материалов, из которых они сделаны. Часть этих характеристик, таких как трибологические, коррозионные, электропроводные и др., определяются свойствами поверхности. По этой причине для повышения эксплуатационных характеристик конструкций и деталей машин на их поверхности искусственно синтезируются функциональные покрытия (ФП) – слоистые структуры с требуемыми свойствами, которые выполняют определённый набор функций. Как правило ФП отличаются от основного материала свойствами, структурой и химическим составом. Целью синтеза ФП может являться защита основного материала от окружающих агрессивных сред, высоких температур, нагрузок, улучшение электропроводящих свойств. Также возможно обновление формы повреждённых деталей, в случае, когда изготовление нового изделия влечёт большие затраты, чем его восстановление. Один из способов получения ФП – технология прямого лазерного нанесения металлических порошков (ПЛНМП), суть которой заключается в плавлении лазерным излучением порошкообразного присадочного материала на металлической подложке. В процессе нанесения поток металлического порошка подаётся на подложку через сопло в зону воздействия лазерного излучения. При движении сопла относительно подложки после остывания образуется одиночный валик.

Чистые металлы после кристаллизации всегда состоят из кристаллитов одного типа, т.е. из зёрен одинакового химического состава. Совокупность зёрен (кристаллитов) одинакового химического состава называется фазой. Следовательно, все чистые металлы являются однофазными. Так как для создания ФП в большинстве случаев используются многокомпонентные металлические порошки, то в процессе синтеза образуются кристаллы разного химического состава. Из вышеизложенного следует, что получаемый материал является многофазным, а разновидности образующихся кристаллов

определяют его фазовый состав. Процесс образования ФП во время кристаллизации редко бывает однозначным, поскольку характеризуется несколькими факторами: взаимной растворимостью компонентов, условиями охлаждения, последующей термообработкой. Свойства синтезированных ФП определяются их микроструктурой, т.е. видом и составом структурных составляющих, на которые в свою очередь оказывает влияние фазовый состав. Под действием лазерного излучения на металлический порошок оказывают воздействие различные процессы: тепловые, химические, термомеханические и др., влияющие на конечные свойства получаемого покрытия. Во время лазерного нанесения в результате плавления металлического порошка происходит изменение его фазового состава и, соответственно, его свойств: плотности, микротвёрдости, пористости, а также прочностных, упругих и других характеристик. Таким образом, благодаря целенаправленному варьированию режимов воздействия лазерного излучения на металлический порошок и на подложку возможно управлять свойствами получаемых ФП. Также путем добавления в порошковую смесь различных металлических и неметаллических включений открывается возможность придания синтезируемому покрытию дополнительных свойств.

Помимо этого, ПЛНМП позволяет получать функциональные материалы (ФМ), которые благодаря синтезу будут обладать управляемым набором характеристик, отвечать поставленным требованиям и выполнять определённый набор функций. В процессе их синтеза контролируется химический состав, термические циклы, геометрия материала, и другие характеристики, влияющие на конечные свойства синтезируемого ФМ. Существенное значение имеет пространственная стабильность свойств синтезируемого материала, для того чтобы изделие полностью отвечало заявленным требованиям. Однако имеют место и противоположные случаи успешного синтеза, т.е. получение функционально-градиентных материалов – класса материалов, имеющих плавное или скачкообразное изменение свойств и состава как минимум в одном измерении.

Обычно при создании изделия с помощью механической обработки производится фрезеровка, сверление и прочие процессы, связанные с удалением лишнего материала, и как следствие образованием большого количества отходов в виде стружки. Для создания сложнопрофильных изделий в некоторых случаях целесообразно создавать их с помощью послойного синтеза слоёв требуемой формы. Технология ПЛНМП для получения ФМ подразумевает синтез изделия путём добавления материала в требуемом месте с минимальным количеством отходов и локальным контролем свойств.

Материалы с контролируемым макроскопическим распределением фазового состава обладают повышенными эксплуатационными характеристиками из-за благоприятного сочетания свойств и качеств базовых материалов. Например, сочетание двух порошковых смесей на основе никеля и карбида вольфрама позволяет создать износостойкий материал с контролируемым пространственным положением карбида вольфрама и связующего никелевого сплава. Однако активное применение данных технологий в промышленности возможно лишь после проведения полного цикла исследований процессов, протекающих при получении деталей из порошкового материала. В настоящее время ПЛНМП для синтеза ФМ занимает нишу в металлообработке по созданию уникальной продукции. Высокая цена получаемого изделия не позволяет данной технологии быть конкурентоспособной в традиционном машиностроении, основанном на механической обработке заготовки. К таким уникальным деталям относятся заготовки пресс-форм, специальные инструменты, импланты, различные прототипы. Однако круг решаемых задач постоянно расширяется, что влечёт за собой совершенствование имеющихся и создание новых технологических процессов и установок.

Функциональные покрытия и материалы можно классифицировать по свойствам, которые в них усиливаются или подавляются, на следующие типы: сенсорные, оптические, электрические, магнитные, ядерные,

конструкционные, пористые и другие. В данной работе были получены конструкционные материалы в которых происходило усиление следующих свойств: износостойкость, коррозионная стойкость, микротвердость и прочность. Управлять этими свойствами в деталях можно различными способами, например, с помощью термообработки, легирования, обработки давлением, и многими другими, в том числе и с помощью ПЛНМП. Описанные способы позволяют управлять как правило одним из перечисленных свойств материалов, а применением ПЛНМП имеет возможность управлять несколькими свойствами.

В работе использовалась оптическая головка с коаксиальной подачей порошка (рис. 1). Данный выбор объясняется тем, что это позволяет достичь изотропности в направлении нанесения порошковых материалов, что невозможно при боковой подаче порошка. Лазерное излучение распространяется через внутренне коническое сопло. Фокусировка излучения настроена таким образом, чтобы перетяжка была расположена в самом узком месте - на срезе сопла. Металлический порошок при этом подаётся между двумя коническими соплами. Благодаря этому исключается взаимодействие излучения с порошком внутри сопла. В противном случае могло бы происходить налипание порошка на внутренние стенки сопла из-за его плавления излучением. Со временем это грозит нарушением потока порошка и засорением сопла.

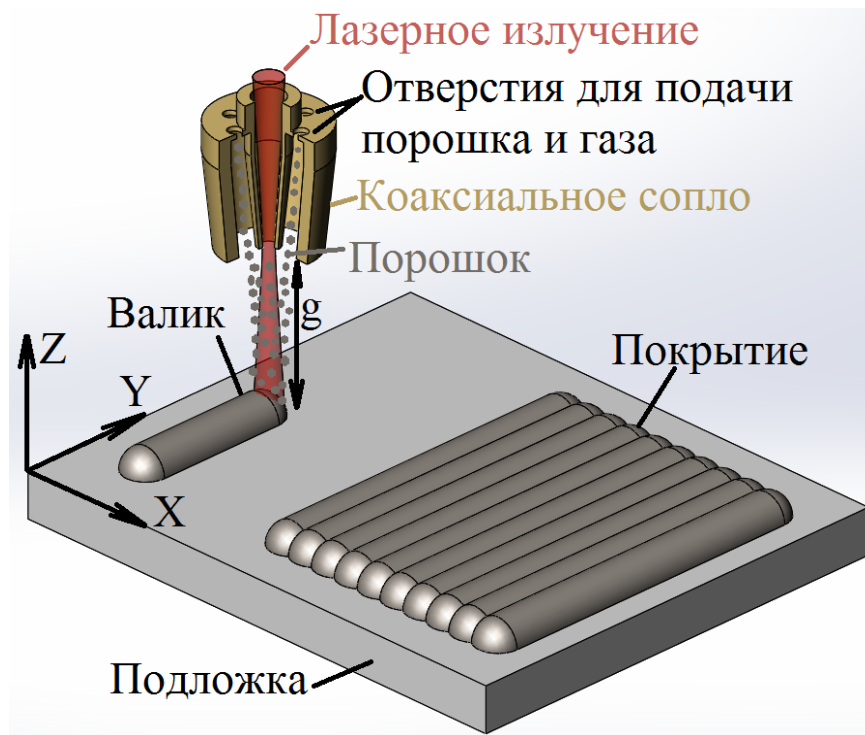


Рисунок - 1 Схематическое изображение коаксиального лазерного нанесения металлического порошка

Вышесказанное обуславливает цель работы: разработать и исследовать технологию создания функциональных покрытий и материалов методом ПЛНМП, а также определить факторы, влияющие на их свойства.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и выполнены следующие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на микротвердость и износостойкость покрытий
2. Разработать технологию синтеза покрытия с повышенным значением микротвердости.
3. Разработать технологию синтеза покрытий с повышенной износостойкостью
4. Определить влияние добавки кобальта к стальному порошку на коррозионную стойкость синтезируемых ФП.
5. Разработать стратегии синтеза объёмных ФМ с помощью ПЛНМП.

6. Определить факторы, влияющие на прочность объемного ФМ, синтезированного с помощью ПЛНМП
7. Определить технологические режимы синтеза ФМ с повышенным значением прочности по сравнению с прокатом.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Разработана теоретическая модель, описывающая геометрическую форму синтезируемого материала, получаемого путём лазерного нанесения металлических порошков
2. Получена и апробирована теоретическая модель, прогнозирующая распределение температуры подложки в области воздействия лазерного излучения в процессе ПЛНМП.
3. Определены зависимости геометрических характеристик синтезируемых валиков от различных технологических параметров нанесения.
4. Установлено влияние тугоплавких добавок карбида вольфрама и оксида алюминия, а также кобальта на свойства синтезируемых ФП.

**Практическая значимость**

1. Получены технологические карты синтеза одиночных валиков с помощью ПЛНМП с применением широкого спектра металлических порошков
2. Улучшено прогнозирование химического состава наносимого функционального материала с помощью двух способов:
  - 2.1. использование технологии нанесения с учётом тепловых полей
  - 2.2. варьирование перекрытия наносимых валиков
3. Разработаны способы улучшения свойств ФП и ФМ:
  - 3.1. путём добавки в порошковую смесь дополнительных компонентов
  - 3.2. путём нанесения с учётом тепловых полей



4. Апробирована технология восстановления формы лопаток газовых турбин из жаропрочного сплава ЭП718 с применением технологии ПЛНМП.
5. С помощью технологии ПЛНМП получены объёмные ФМ из титана, а также нержавеющей стали с использованием лазерного излучения с плотностью мощности от 1000 до 4000 Вт/мм<sup>2</sup>, обладающие механическими свойствами выше, чем у аналогичного проката.
6. Разрушение полученных с помощью ПЛНМП материалов на основе стали 316L и титанового сплава ВТ6 из нержавеющей стали идет по границе включений сферической формы.

Работа является частью исследования выполненного в рамках ПНИЭР «Разработка технологии и оборудования для прецизионного производства ответственных сложнопрофильных изделий специального назначения с целью перехода промышленности Российской Федерации к новому типу производства продукции в рамках шестого технологического уклада»

### **Содержание работы**

**В первой главе** приводится литературный обзор по основам ПЛНМП для получения функциональных материалов с прогнозируемыми свойствами. Рассмотрены проблемы, над которыми в настоящее время проводится широкий спектр исследовательских работ. К таковым относятся недостаточно высокое качество поверхности синтезируемых функциональных материалов, низкая экономическая эффективность, отсутствие систем онлайн-контроля качества синтезируемого материала и другие. Также в первой главе излагается информация о перспективах использования данных технологий в промышленности. Приведены примеры применения ПЛНМП в авиационной промышленности, а также для изготовления имплантов в медицине. Один из разделов посвящён применению различных лазеров в технологических установках прямого лазерного нанесения металлических порошков для синтеза функциональных материалов. Наибольшее применение в промышленности нашли волоконные

лазеры в силу их надёжности, отсутствия необходимости в юстировке и в частом обслуживании и низких затрат на расходные материалы.

**Вторая глава** посвящена результатам исследования параметров синтезированных одиночных валиков и слоёв на плоской металлической подложке. Первоначально описывается экспериментальная установка и используемые материалы: порошки на основе железа, никеля, титана, кобальта и карбида вольфрама. Приводится подробное описание используемой лазерной установки и оптической системы, а также расчет ее параметров, таких как длина перетяжки и диаметр пятна излучения в фокусе. Затем изложено исследование зависимости геометрических параметров валиков от технологических режимов для различных порошков. Приведены результаты исследования ширины, высоты, площади синтезируемого валика, а также глубины, площади проплавления и коэффициента смешивания от мощности излучения, скорости сканирования, массового расхода порошка, зазора между соплом и подложкой. Наряду с этим во второй главе рассмотрена рекурсивная математическая модель, описывающая геометрическую форму одиночного валика и однослойного покрытия. Форма валика с высокой точностью описывается с помощью эллиптической либо параболической функции. Также приведён расчёт тепловых полей на поверхности подложки при послойном синтезе. Проведено исследование однослойных структур, полученных с учётом смоделированных и измеренных тепловых полей. Продемонстрированы особенности таких покрытий по сравнению с простым последовательным синтезом валиков.

**В третьей главе** исследуются факторы, влияющие на характеристики синтезируемых многослойных ФП. Проведено исследование влияния угла между валиками первого и второго слоёв на свойства двухслойных покрытий. Рекурсивная модель расчёта геометрической формы слоёв апробирована для многослойных покрытий. Обнаружено влияние содержания порошка на основе кобальта в смеси с железным порошком на коррозионную стойкость синтезируемого ФП. Добавка к железному порошку

карбидов вольфрама в массовом отношении 7-9% позволила увеличить износостойкость синтезируемого ФП в 1.5 раза. Также показано влияние добавок  $Al_2O_3$  к титановому порошку на свойства синтезированных покрытий.

**В четвертой главе** рассматривается синтез объёмных образцов с помощью ПЛНМП из различных металлов. Проведён анализ объёмных образцов, полученных с различными стратегиями и при различных технологических режимах. Выбранная оптимальная стратегия позволила получить ФМ без проведения термообработки с механическими свойствами аналогичного материала, полученного литьём, но требующего дополнительной термообработки. Анализ макросъёмки сколов полученного материала после испытаний на растяжение свидетельствует, что разрушение ФМ идёт по границе основного материала с оксидами сферической формы, присутствующими внутри материала.

## **Заключение**

На основе проведённого исследования достигнуты следующие взаимосвязи основных показателей при синтезе функциональных покрытий и материалов с помощью ПЛНМП:

1. наибольшее влияние на высоту синтезируемого валика и коэффициент смешивания материалов оказывает изменение массового расхода порошка, а на его ширину и глубину проплавления подложки – изменение мощности лазерного излучения;
2. геометрическая форма синтезированного одиночного валика аппроксимируется с высокой точностью с помощью эллиптической, параболической или косинус функциями;
3. применение рекурсивной модели позволяет прогнозировать форму синтезируемых покрытий;
4. увеличение коэффициента перекрытия валиков от 0.33 до 0.66 при синтезе покрытий уменьшает коэффициент смешивания присадочного материала с подложкой;
5. применением технологии ПЛНМП позволяет восстанавливать форму повреждённых лопаток газовых турбин из жаропрочного сплава ЭП718 с незначительным уменьшением твёрдости без несплавлений, пор и других внутренних дефектов.
6. скорость коррозии линейно убывает с добавлением содержания порошка на основе кобальта от 25% до 75% в смеси со стальным порошком;
7. на микротвёрдость синтезируемого материала влияет температура подложки во время нанесения металлического порошка, т.к. при нанесении порошка на более горячую подложку происходит большее замешивание материала подложки в покрытие. Учёт тепловых полей при синтезе покрытий способствует увеличению точности прогнозирования их химического состава, а также приводит к увеличению микротвёрдости синтезируемых покрытий в сравнении с последовательным нанесением

- валиков. Добавка  $Al_2O_3$  до 20% в порошок титанового сплава ВТ6 приводит к увеличению твёрдости ФП и не приводит к его охрупчиванию;
8. на износостойкость покрытия влияет содержание тугоплавкой добавки карбида вольфрама. Максимальная добавка к порошку из стали Р6М5 составляет 7% без проведения дополнительной термообработки до и после нанесения. Массовая добавка 7% WC к стальному порошку Р6М5 увеличивает износостойкость в 1.5 раза по сравнению с покрытием, синтезированным из чистого Р6М5.
9. сильное влияние на прочность синтезируемого материала оказывает мощность излучения. Для нержавеющей стали происходит уменьшение предела прочности с увеличением мощности от 200 до 350 Вт, для сплава ВТ6 – увеличение предела прочности при изменении мощности от 100 до 300 Вт. Синтезированные образцы обладают анизотропией свойств. Синтезированные ФМ без дополнительной термической обработки обладают повышенными физико-механическими свойствами по сравнению с прокатом.

#### **Список работ, в которых опубликованы основные положения диссертации**

1. Loginova I.S. и др. Peculiarities of the Microstructure and Properties of Parts Produced by the Direct Laser Deposition of 316L Steel Powder // Russ. J. Non-Ferrous Met. 2019. Т. 60, № 1. С. 87–94.
2. Выковский D.P. и др. Direct metal laser deposition of titanium powder Ti-6Al-4V // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Т. 941, № 1.
3. Выковский D.P. и др. Mechanical properties of the samples produced by volume powder cladding of stainless steel using a continuous fiber laser // J. Phys. Conf. Ser. 2016. Т. 747, № 1.
4. Выковский D.P. и др. Development of the recovery technology for nickel superalloy blades of the aircraft engine by laser cladding // J. Phys. Conf. Ser. 2016. Т. 747, № 1. С. 12056.

5. Petrovskiy V.N. и др. Properties of multilayer coatings produced by coaxial laser cladding // J. Phys. Conf. Ser. 2016. Т. 747, № 1. С. 12064.
6. Bykovskiy D.P. и др. Ways of optimization the process of three-dimensional laser cladding using a layer by layer strategy of powder alloying // Proceedings - 2016 International Conference Laser Optics, LO 2016. 2016.
7. Bykovskiy D.P. и др. Analysis of microstructure and properties of multilayer coatings produced by laser cladding // J. Phys. Conf. Ser. 2016. Т. 691, № 1. С. 12008.
8. Бирюков В.П. и др. Влияние режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на абразивную износостойкость покрытий // Фотоника. 2016. Т. 57, № 3. С. 32–43.
9. Бирюков В.П. и др. Повышение ресурса работы деталей машин по критерию абразивной износостойкости лазерной наплавкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. Т. 143, № 11. С. 8–12.
10. Логинова И.С. и др. Исследование влияния параметров процесса лазерной наплавки порошка стали 316L на структуру и механические свойства образцов // Технология легких сплавов. 2016. № 4. С. 5–11.