

На правах рукописи



СОКОЛОВ Юрий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ
ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДОМ
ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА**

Специальность: 05.16.06 – Порошковая металлургия
и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант:

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор

Рудской Андрей Иванович, ректор ФГАОУ ВО «СПбПУ», профессор кафедры технологии и исследования материалов ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Емельянов Владислав Николаевич**, заведующий кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (г. Санкт-Петербург)

доктор технических наук, профессор **Крапошин Валентин Сидорович**, профессор кафедры материаловедения ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (г. Москва)

доктор технических наук, доцент **Серов Михаил Михайлович**, профессор кафедры технологий и систем автоматического проектирования металлургических процессов ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского» (МАТИ) (г. Москва)

Ведущая организация:

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «22» октября 2015г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " " июля 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Климова О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка инновационной технологии послойного синтеза изделий (ТПСИ), проектирование принципиально нового специализированного оборудования открывают новые возможности по созданию композиционных изделий из порошков различного химического состава с заданной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами (многокомпонентные магниты, композиционные средства противоударной защиты и др.). ТПСИ включает следующие технологические операции: получение порошка из различных металлов и сплавов, в том числе из тугоплавких химически активных металлов; послойное формирование изделий с помощью электронного луча, вакуумной пайки, плазменного и электронно-лучевого напыления и других методов; высокотемпературная газостатическая обработка (при необходимости).

Новые возможности по созданию порошковых изделий предоставляют гибридные технологии, которые сочетают различные методы послойного формирования изделия: электронно-лучевой/ионный синтез, вакуумная пайка, электронно-лучевое напыление.

Получение композиционных изделий с необходимым комплексом прочностных и пластических свойств обеспечивается различным сочетанием основного и упрочняющего порошка. В качестве последнего могут использоваться порошки тугоплавких металлов и сплавов (титан, молибден, ниобий, тантал, вольфрам; их карбиды, бориды, нитриды). Одним из путей достижения высокой прочности порошковых изделий является создание бездефектной исходной ячейки для последующего синтеза изделия.

Среди различных методов получения порошка сферической формы в России наиболее широкое распространение получил метод вращающегося электрода/заготовки с плазменным нагревом (PREP), при котором заготовка подаётся в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце заготовки образуется жидкая плёнка металла толщиной в несколько раз меньше диаметра образующегося порошка. Разработка технологических режимов получения порошка сферической формы, в том числе тугоплавких металлов и сплавов, методом PREP, технологии послойного синтеза изделий электронным лучом представляет собой актуальную задачу, для реализации которой с целью сокращения расходов на исследование и времени на проведение экспериментальных процессов целесообразно использовать методы математического моделирования.

Процесс синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) относительно новый, но уже успешно показавший большие перспективы своего использования в аэрокосмической промышленности для изготовления широкой номенклатуры деталей и конструкций самолетов, вертолетов, космических ракет и подсистем, а также в ортопедии, для изготовления имплантатов. В его основу положена операция послойного спекания/плавления металлического порошка в вакууме с помощью электронного луча. Данный подход отличает быстрый переход к изготовлению трехмерных изделий непосредственно от системы автоматизированного проектирования, возможность использования широкого спектра металлов и сплавов, в том числе тугоплавких.

Целью работы является создание нового подхода к получению порошковых и композиционных изделий различного химического состава с программируемой структурой, не реализуемых в рамках равновесных и квазиравновесных

технологических процессов, методами послойного электронно-лучевого плавления/спекания, пайки и напыления; разработка гибридной технологии и специализированного технологического оборудования для синтеза конструкционных и функциональных материалов на основе численного математического моделирования процессов получения порошка методом плазменного распыления вращающегося электрода и послойного электронно-лучевого плавления.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные **задачи**:

1. Разработка научно-технических основ нового подхода к получению порошковых и композиционных изделий различного химического состава с программируемой структурой методами послойного электронно-лучевого плавления/спекания, вакуумной пайки и электронно-лучевого напыления.

2. Научное обоснование особенностей получения металлических порошков, включая порошки тугоплавких металлов и сплавов, методом плазменного распыления вращающегося электрода на базе аэротермодинамической математической модели, объединяющей аэродинамические параметры с параметрами тепло- и массопереноса и удара частицы о стенку камеры.

3. Разработка математической модели процесса послойного электронно-лучевого синтеза изделий, с учётом фазовых переходов расплавленного слоя и гидродинамических процессов движения жидкого металла.

4. Разработка инновационной гибридной технологии получения изделий из порошков различного химического состава, включающей следующие технологические операции:

- получение порошка шаровидной формы из различных металлов и сплавов, включая порошок тугоплавких химически активных металлов;

- послойное формирование изделий с помощью электронного луча или ионного пучка, вакуумной пайки, плазменного и электронно-лучевого напыления и других методов;

- высокотемпературная газостатическая обработка (при необходимости).

5. Экспериментальное исследование порошковых изделий из титанового сплава ВТ6, полученного по технологии послойного электронно-лучевого синтеза.

6. Получение композиционного материала из порошков титанового сплава и молибдена методами послойного электронно-лучевого плавления, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления различных металлических (сплавы на основе никеля, кобальта, хрома, алюминия, иттрия) и керамических слоёв (оксиды циркония и иттрия).

7. Разработка научно-технических основ и конструктивных решений специализированного технологического оборудования для:

- производства порошков химически активных металлов и сплавов (титан, молибден, ниобий, вольфрам, цирконий, интерметаллиды и др.);

- реализации гибридных технологий послойного электронно-лучевого плавления/спекания и напыления;

- реализации операций послойного синтеза изделий электронным и/или ионным пучком.

8. Проектирование математического, алгоритмического и программного обеспечения специализированного технологического оборудования для получения порошка методом плазменного распыления вращающегося электрода и послойного синтеза изделий.

Научная новизна диссертационной работы состоит в создании концепции нового подхода к получению изделий с программируемой структурой из порошка различного химического состава, проектировании численных математических моделей процессов получения порошка и послойного электронно-лучевого синтеза, развитии научно обоснованных технических решений при разработке специализированного технологического оборудования, а именно:

1. Научно обоснован и разработан новый подход для получения порошковых и композиционных изделий с программируемой структурой из порошка различного химического состава методами послойного электронно-лучевого синтеза, пайки и напыления. Предложенный подход позволяет не только создавать принципиально новые композиционные изделия с прогнозируемыми свойствами, которые невозможно получить традиционными способами, но и изготавливать из них изделия сложной геометрической формы. Композиция порошка различного химического состава в каждом горизонтальном и вертикальном слое материала может быть изначально запрограммирована. В процессе «роста» изделия осуществляется заданное формирование структуры изделия путём локальной термической обработки изделия электронным лучом или модификации слоя ионным пучком.

2. Определены научно-технические закономерности процессов получения новых порошковых и композиционных изделий с использованием различных технологических методов, основанные на предварительном моделировании и отработке всех технологических операций, что позволяет формировать изделия из порошка различного химического состава, включая порошок химически активных металлов.

3. Предложена математическая модель процесса получения порошка тугоплавких металлов и сплавов методом плазменного распыления вращающегося электрода, включающая:

- аналитические зависимости теплофизических свойств газовой среды и материала частицы от температуры;
- аналитическую модель аэродинамики полёта частицы;
- численную модель расчёта деформаций вследствие взаимодействия частицы со стенкой камеры;
- численную аэротермодинамическую модель, связывающую аэродинамические параметры (скорость, время полёта частицы) с параметрами тепло- массопереноса (температура, давление, плотность, коэффициент динамической вязкости и др.).

4. Предложено математическое обеспечение процесса электронно-лучевого синтеза изделий, включающее:

- последовательность технологических операций;
- модель взаимодействия сканирующего электронного луча с изделием (расчёт мощности луча, скорости сканирования, удельной энергии);
- численную модель тепло- и массопереноса при синтезе изделия с учётом переноса тепла и фазовых превращений расплавленного слоя (задача Стефана), гидродинамических процессов движения вязкого сжимаемого жидкого металла со свободной верхней границей вследствие действия гравитационных, капиллярных и термокапиллярных сил;
- расчёт оптимальных значений параметров процесса на базе аппарата векторной оптимизации.

5. Изучены свойства порошкового титанового сплава ВТ6, полученного по технологии послойного синтеза электронным лучом.

6. Экспериментально исследованы общие закономерности получения композиционных изделий с программируемой структурой из порошков титанового сплава и молибдена с применением различных методов послойного синтеза (электронный луч, напыление, пайка).

Научная новизна конструкторских и программных решений защищена тремя патентами и одним свидетельством РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Решение поставленных задач базируется на научных положениях теорий индукционного нагрева, электронно-лучевой обработки, плавления, центробежного распыления, тепловых процессов, упругого и пластического деформирования материалов, технологии машиностроения, численных методов решения дифференциальных уравнений, системном анализе систем управления, работ по теории и практике параллельных вычислений.

Для решения поставленных задач использованы современные методы исследований и измерительная аппаратура: сканирующий интерференционный микроскоп ZYGO NewView 7300; атомно-силовой микроскоп Solver 47H с приставкой для исследования модуля Юнга и твердости на наноуровне; растровый электронный микроскоп Jeol 6510 LV; система микроанализа INCA Energy++ фирмы Oxford Instruments; исследовательский инвертированный микроскоп Axiovert 200 MAT; электронный измеритель шероховатости TR200; оптический профилометр NanoMap; универсальный твердомер Zwick/Roell ZHU 250; испытательная машина Zwick/Roell-Z050; маятниковый копер RKP-450.

Практическая значимость результатов работы:

1. Разработана гибридная технология получения новых классов композиционных изделий с заданной структурой, не реализуемая в рамках равновесных и квазиравновесных технологических процессов.
2. Рассчитаны конструктивные параметры специализированного оборудования и технологические режимы процесса получения порошка тугоплавких металлов и сплавов методом плазменного распыления вращающегося электрода.
3. Рассчитаны технологические режимы процесса синтеза порошковых изделий с помощью электронного луча, параметры управляющей программы процесса электронно-лучевого синтеза изделий для сплава ВТ6.
4. Изучены состояние поверхности и механические характеристики порошкового титанового сплава ВТ6, полученного методом электронно-лучевого синтеза.
5. Получены композиционные изделия из порошков титанового сплава ВТ6, молибдена, оксида молибдена методами послойного электронно-лучевого плавления и вакуумной пайки; электронно-лучевого напыления различных металлических (сплавы на основе никеля, кобальта, хрома, алюминия, иттрия) и керамических слоёв (оксиды циркония и иттрия).
6. Разработаны конструктивные решения специализированного оборудования для реализации гибридных технологий, сочетающих различные методы послойного формирования изделия (электронно-лучевой синтез, ионный синтез, вакуумная пайка, электронно-лучевое напыление, ионно-имплантационная модификация поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов). Предложенные оригинальные конструкторские решения механизмов могут быть использованы в различном оборудовании послойного синтеза изделий.
7. Предложена классификация специализированного технологического оборудования для реализации операции послойного синтеза электронным лучом в зависимости от способа подачи и устройства хранения порошка, схемы

формирования различных сочетаний порошков, способа формирования горизонтального слоя из порошков различного химического состава.

8. Разработаны различные исполнения мультипроцессорных систем управления специализированного оборудования, включающие набор современных микропроцессорных, микроконтроллерных и компьютерных аппаратных средств; библиотеки математического и алгоритмического обеспечения; программные модули, которые реализуют различные априорные и адаптивные законы управления процессами получения порошка, послойного синтеза изделий и базируются на обработке информации в реальном масштабе времени с использованием датчиков обратной связи и устройств управления сканированием луча. Программные решения позволяют повысить уровень управляемости и повторяемости параметров технологического процесса, исключить влияние субъективных факторов на процесс синтеза.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечиваются корректностью постановки задач исследования и комплексным подходом к их решению; большим объемом расчетов и экспериментов и критическим сравнением полученных данных с результатами других авторов; использованием современных методов математического моделирования, экспериментальных исследований, аналитического оборудования; привлечением статистических методов обработки результатов.

Личный вклад автора заключается в разработке концепции диссертационной работы и нового подхода для получения порошковых и композиционных изделий, формулировании цели, определении задач, проектировании математических моделей, выполнении экспериментальных исследований, участии в разработке систем управления и программного обеспечения специализированного технологического оборудования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к получению конструкционных, функциональных и композиционных изделий с программируемой структурой и заданными свойствами из порошков различного химического состава, основанный на пооперационном математическом моделировании процессов получения порошка методом плазменного распыления вращающегося электрода и послойного синтеза изделий методами электронно-лучевого плавления/спекания, пайки и напыления и др.

2. Аэротермодинамическая математическая модель процесса получения порошка шаровидной формы методом плазменного распыления вращающегося электрода, связывающая аэродинамические параметры (скорость, время полёта частицы) с параметрами тепло- массопереноса (температура, давление, плотность, коэффициент динамической вязкости и др.).

3. Математическая модель процесса синтеза изделий электронным лучом, включающая:

- управляемый нагрев подложек различной геометрической формы,
- спекание/плавление слоя порошка с помощью электронного луча,
- расчёт оптимальных параметров на базе аппарата векторной оптимизации.

4. Обоснование технологических режимов процесса послойного электронно-лучевого синтеза изделий из порошка титанового сплава.

5. Алгоритмическое и программное обеспечение процесса синтеза изделий из порошка тугоплавких титановых сплавов.

6. Конструкторские решения специализированного технологического оборудования для реализации технологий получения порошка методом

плазменного распыления вращающегося электрода, послойного синтеза изделий методами электронно-лучевого и ионного плавления/спекания, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления, ионно-имплантационной модификации поверхности слоя с использованием источника высокоэнергетических ионов.

7. Результаты исследований химического состава, механических и триботехнических свойств порошковых и композиционных изделий, полученных по технологии послойного синтеза изделий.

Апробация результатов работы. Результаты исследований и основные узлы предложенных конструктивных решений технологического оборудования докладывались и обсуждались на первой Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Электронно-лучевые технологии», г. Санкт-Петербург, 2008 г.; второй Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Электронно-лучевые технологии», г. Санкт-Петербург, 2011 г.; третьей Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Электронно-лучевые технологии», г. Санкт-Петербург, 2014 г.; научно-практической конференции кафедры «Сварочное производство» МАТИ, г. Москва, 2009 г.; первом инновационном форуме «Университет – региону», г. Тверь, 2008 г.; втором инновационном форуме «Университет – региону», г. Тверь, 2010 г.; симпозиуме Межрегиональной Общественной Организации «Московский Межотраслевой Альянс Главных Сварщиков» (МРОО ММАГС), г. Москва, 2014 г.; научно-производственной конференции «Новое специализированное оборудование для современных технологических процессов», г. Ржев, 2014 г.; втором Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство», секция «Аддитивные технологии», г. Рыбинск, 2015 г.

Эффективность и работоспособность выдвинутых в диссертационной работе научных положений подтверждается внедрением электронно-лучевого и центробежного оборудования, оснащённого мультипроцессорными компьютерными системами управления в ОАО "Электромеханика" (г. Ржев), ОАО «ВИЛС» (г. Москва), ОАО «НПО Сатурн» (г. Рыбинск), ММПП «Салют» (г. Москва).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 56 печатных работ, в том числе 37 в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, а также 3 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 422 страницах, содержит: 23 таблицы, 188 рисунков. Библиографический список включает 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту, и указан личный вклад автора в исследования, проведенные по теме диссертации.

В первой главе обоснована необходимость разработки и внедрения высокоэффективных способов синтеза порошковых изделий различными методами, на основе анализа известных публикаций рассмотрена

последовательность операций ТПСИ, приведены алгоритмы операции электронно-лучевого синтеза изделий.

Новые возможности по созданию изделий из порошков, значительно отличающихся температурой плавления и теплофизическими свойствами, предоставляет гибридная технология, сочетающая СИЭЛ с другими методами: пайка, напыление и т.д. При этом для формирования матрицы изделия наиболее эффективным является метод электронно-лучевого/ионного плавления, отличающийся высокой производительностью, а для получения демпфирующих, дисперсно-упрочняющих и керамических слоёв толщиной от единиц нанометров до десятков микрон с целью придания материалу необходимых свойств (жаропрочность, жаростойкость, прочность и др.) – метод электронно-лучевого напыления. Особо следует отметить эффективность сочетания различных методов при создании изделий из порошков неоднородного химического состава, что позволяет получать различные комбинации металлических и керамических слоёв.

Для послойного получения изделий можно использовать различные методы: синтез с помощью лазерного, электронного или ионного луча; электронно-лучевое осаждение; пайка; вакуумное спекание; газопламенное сверхзвуковое нанесение порошковых покрытий; магнетронное высокочастотное напыление.

Метод электронно-лучевого напыления, основанный на явлении испарения и конденсации паров различных материалов в вакуумной среде, позволяет получать слои из следующих комбинаций металлических и керамических систем: $MeCrAlY$ (где $Me - Ni, Co, Fe$), $MeCrAlYH_fSiZr$, керамики $ZrO_2 - Y_2O_3$, а также формировать композиционные покрытия с демпфирующими, дисперсно-упрочняющими и керамическими слоями. К числу достоинств данного метода следует отнести: возможность получения слоя толщиной 1-3 микрона, что снижает вероятность возникновения остаточных напряжений в слое; высокую чистоту и химическую однородность образующегося слоя; возможность формирования слоя практически из любого материала; высокую степень автоматизации и контроля технологического процесса.

Методы плазменного нанесения порошков со сверхзвуковой скоростью «High-Velocity-Oxygen-Fuel» (HVOF) и «High-Velocity-Air-Fuel» (HVAF) отличает высокая адгезия слоя, низкая пористость. Распыляемые материалы (полимеры, карбиды, металлы) образуют термобарьерные, износо- и коррозионностойкие покрытия высокого качества, которые выдерживают воздействие высоких тепловых, ударно-абразивных и химически активных нагрузок. Метод применяется для нанесения металлических и керамических порошковых материалов (оксиды алюминия и циркония).

Большое внимание в первой главе уделено разработке алгоритмов процесса послойного синтеза изделий электронным лучом, к особенностям которого по сравнению с более традиционными прикладными технологиями, можно отнести: безокислительную среду для синтеза химически активных материалов; возможность синтеза тугоплавких металлов и сплавов; дополнительную очистку порошка в процессе обработки; объёмный источник тепла вследствие пробега электронов вглубь порошка; малый диаметр пучка в месте его встречи с подложкой; высокую удельную поверхностную плотность луча; периодический характер приложения тепловой нагрузки к каждой точке поверхности подложки; простое управление отклонением луча; зависимость тока фокусировки луча от угла его отклонения (для электронных пушек без преломления луча). Показано, что этот метод может обеспечить управляемое формирование структуры

материала в каждом слое: регулируя скорость сканирования электронного луча, ток луча и фокусировки, можно получить программно заданную структуру материала. Вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения (до 10^5 °C/c) формируется структура сплава с мелким зерном.

Обработка электронным лучом поверхности в режиме спекания/плавления порошка происходит последовательно по горизонтальным и вертикальным линиям, что оказывает существенное влияние не только на температурное поле в исследуемой системе, но и шероховатость поверхности.

На основании рассмотренного в первой главе сформулирована цель диссертационной работы: разработка нового инновационного подхода к получению порошковых и композиционных изделий различного химического состава с программируемой структурой, не реализуемых в рамках равновесных и квазиравновесных технологических процессов, методами послойного электронно-лучевого плавления/спекания, пайки и напыления на базе численного математического моделирования.

Во второй главе выполнена разработка математических моделей (ММ) процесса получения порошка тугоплавких металлов и сплавов методом PREP. Численная модель позволяет не только исследовать процесс получения порошка из различных металлов и сплавов, но и оптимизировать значения параметров управляющей программы (частота вращения заготовки, рабочая мощность плазматрона, диаметр факела на торце заготовки, смещение факела плазмы относительно оси заготовки, технологический зазор между заготовкой и плазматроном, состав смеси инертных газов и др.).

Для расчёта диаметра порошка шарообразной формы, исследования процесса охлаждения и кристаллизации частиц в полёте, определения напряженно-деформированного состояния в области взаимодействия частицы со стенкой камеры был разработан ряд ММ:

1. аналитические зависимости теплофизических свойств газовой среды и материала частицы от температуры,
2. аэродинамическая модель полёта частицы,
3. модель напряженно-деформированного состояния при взаимодействии частицы со стенкой камеры,
4. аэротермодинамическая модель,
5. параметрическая оптимизация технологических режимов получения порошка.

Следует отметить, что связь между различными моделями процесса имеет достаточно сложный характер.

В разделе 2.1 определены аналитические зависимости теплофизических свойств газовой среды (гелия и аргона) и материала частицы (титан) при температурах до 2000 °C. Функциональные зависимости коэффициента динамической вязкости и плотности от температуры необходимы при моделировании аэродинамики полёта частицы в среде инертных газов, коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости – при исследовании тепловых процессов.

Для определения функциональных зависимостей коэффициента динамической вязкости μ и теплопроводности λ газовой среды была использована формула Сатерленда:

$$\mu = C_1 T_i^{1.5} / (T_i + C_2), \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{C_3 \cdot T_i^{1.5}}{T_i + C_4}$$

(2)

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные коэффициенты; T_i – абсолютная текущая температура, °К.

Функциональная зависимость плотности газа ρ_T от температуры имеет следующий вид:

$$\rho_T = PC_5^{-1} T^{-1}, \quad (3)$$

где P – абсолютное давление, C_5 – постоянный коэффициент.

Полученные аналитические зависимости с применением метода наименьших квадратов позволяют прогнозировать теплофизические свойства охлаждающей инертной среды и материала частицы в диапазоне температур от 20 до 2000 °С. Учёт влияния нелинейности теплофизических параметров от температуры повышает точность расчёта при моделировании процесса получения порошка методом PREP.

В разделе 2.2 рассматривается аэродинамическая модель частицы, связывающая скорость, время и координаты частицы от момента её отрыва от венца до окончания полёта. На частицу в полёте действует сила аэродинамического сопротивления, направленная в сторону противоположную скорости движения, сила тяжести и сила Архимеда. Для исследования динамики полёта частиц было рассмотрено два крайних случая: движение частицы вверх и вниз.

Аналитическая аэродинамическая модель полёта частицы, не учитывающая взаимосвязи тепловых и аэродинамических процессов, позволяет приближённо представить динамику полёта и при проектировании специализированного оборудования определить геометрические размеры камеры распыления.

В разделе 2.3 выполнено исследование напряжённо-деформированного состояния частицы при столкновении со стенкой камеры. Рассмотрен наиболее критичный случай – прямой центральный удар частицы сферической формы о стенку. В общем случае, частица в момент удара о стенку камеры может иметь значения скорости и температуры, при которых происходит пластическая деформация, превышающая предельно допустимую, что отрицательно сказывается на качестве порошка.

Инструментом моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench, пространственный режим – осесимметричная задача, тип расчёта – динамический. В качестве примера рассмотрен процесс столкновения частицы сферической формы диаметром 100 микрон. Материал частицы – титан, стенки камеры – сталь. При расчёте учитывается зависимость модуля упругости материала частицы от температуры, так как оторвавшиеся от венца заготовки частицы имеют температуру близкую к температуре плавления и во время полёта охлаждаются.

При ударе частицы о стенку в их материалах возникают значительные пластические деформации, величина которых зависит от температуры и скорости частицы в момент её столкновения со стенкой камеры.

Для оценки качества получаемого порошка принят допустимый порог упругопластической деформации. Формула для расчёта коэффициента деформации частицы в процентах имеет следующий вид:

$$k\% = \text{abs}(\Delta_1 - \Delta_2) 100 / d_q, \quad (4)$$

где Δ_1 – деформация в верхней области частицы, Δ_2 – деформация в нижней области частицы, d_q – диаметр частицы.

После завершения процедуры заполнения пробными точками ANSYS Workbench исследуемого пространства возможных решений, была построена поверхность отклика. Определена поверхность отклика деформаций частицы на изменение температуры и скорости полёта после удара со стенкой (рис. 1а).

Полученные результаты расчёта позволяют перейти к определению области «скорость – температура частицы», в которой значения деформаций ниже заданного допустимого уровня (рис. 1б).

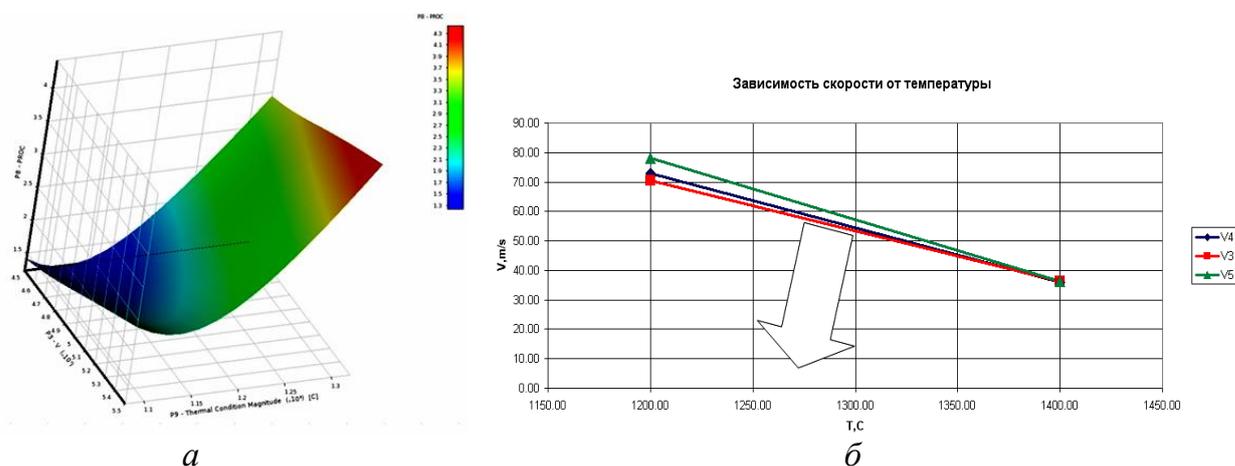


Рис. 1. Поверхности отклика параметра деформаций частицы на изменение температуры и скорости полёта частицы (а), область (скорость - температура частицы), в которой значения деформаций ниже заданного допустимого уровня (б)

Моделирование процесса столкновения частицы из титана со стальной стенкой позволило:

- получить распределение деформаций в частице после столкновения со стенкой;
- определить, что наиболее сильное влияние на деформацию частицы оказывает её температура по сравнению со скоростью полёта;
- рассчитать область допустимых значений в двумерном пространстве параметров: «температура частицы – скорость полёта», в которой величины деформаций являются приемлемыми.

В разделе 2.4 рассмотрен вопрос построения аэротермодинамической ММ процесса получения порошка методом PREP. Задачей моделирования является получение зависимостей, связывающих аэродинамические параметры (скорость, время полёта частицы) с параметрами тепло- массопереноса (распределение температуры, давления, плотности, коэффициента динамической вязкости и др.). Расчет процесса охлаждения частицы распыленного металла в газовой среде требует совместного учета тепловых и аэродинамических явлений.

Сложность задачи определяется, главным образом, не столько нелинейной зависимостью теплофизических свойств газовой среды и материала частицы от температуры, а сколько необходимостью совместного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих аэродинамические и термодинамические процессы. Тепловое воздействие частицы на газовую среду определяет её термодинамическое состояние, которое, в свою очередь, влияет на механическое (сопротивление среды полёту), а скорость полёта частицы – на тепловое (конвективное) взаимодействие. Для повышения точности расчёта необходимо учитывать зависимость коэффициента аэродинамического

сопротивления от скорости полёта частицы и температуры, зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости полёта частицы $V_{\text{ч}}$.

Теплообмен между поверхностью частицы и газом осуществляется путём конвекции, теплопроводности и лучистым переносом, т.е. является сложным. Разработанная модель является физико-математическим представлением исследуемого процесса охлаждения частицы, основанная на численном решении системы дифференциальных уравнений теплопередачи, энергии, аэродинамики, непрерывности.

На частицу в полёте действует сила аэродинамического сопротивления, которую можно представить следующей функциональной зависимостью:

$$F_x = f(C_x, \rho_g, \rho_{\text{ч}}, \nu, V_{\text{ч}}), \quad (5)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса; $\rho_g, \rho_{\text{ч}}$ – соответственно плотность газовой среды и материала частицы; ν – коэффициент кинематической вязкости; $V_{\text{ч}}$ – скорость полёта частицы.

Для организации обратной связи между механической и тепловой составляющими ММ рассмотрено дифференциальное уравнение движения частицы:

$$\Delta V = g\Delta t - \frac{F_{\text{сопр}}}{m_{\text{ч}}} \Delta t, \quad (6)$$

где ΔV – приращение скорости на данном временном шаге; g – коэффициент гравитации; F_x – сила сопротивления; $m_{\text{ч}}$ – масса частицы; Δt – выбранный временной шаг расчёта.

В соответствии с последним уравнением была принята следующая схема расчёта в ANSYS CFX:

- в начальный момент времени принимаем скорость частицы равную скорости её слёта с венца заготовки V_0 ,
- на каждом временном шаге вычисляем аэродинамическую силу сопротивления с учётом теплового поля и скорости частицы,
- осуществляем расчёт скорости частицы в текущий момент времени по (6),
- после вычисления текущей скорости частицы переходим к следующему временному шагу.

В работе выполнено численное моделирование процесса охлаждения на примере частицы из сплава ВТ6 в газовой смеси аргона и гелия. Расчёт выполнен на базе метода конечных элементов (МКЭ) в среде программного комплекса ANSYS Workbench - Fluid Flow (CFX). Пространственный режим - 3D, режим расчета – динамический. Численное моделирование процесса охлаждения титановой частицы рассмотрено в газовой смеси (% масс.): (90 гелия и 10 аргона).

В результате моделирования на примере порошка из титанового сплава ВТ6 были получены поля распределения температуры, давления, плотности, коэффициента динамической вязкости, теплопроводности во время полёта частицы в газовой среде аргона, гелия, смеси аргона и гелия; временные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления, коэффициента теплоотдачи, силы сопротивления во время полёта частицы.

Температурное поле и динамика изменения температуры частицы от времени приведены на рис. 2а, где отчётливо виден фазовый переход частицы из жидкого в твёрдое состояние. Условия кристаллизации частиц расплава,

протекающие с высокой скоростью охлаждения, обеспечивают очень высокий уровень структурных и механических свойств порошка.

На рис. 2б показаны распределение скоростей потока газа в области частицы и две графические зависимости скорости полёта частицы от времени, полученные на базе аэродинамической модели процесса распыления (верхний график) и на базе модели ANSYS CFX (нижний график). Отличие в графиках объясняется зависимостью числа Рейнольдса, коэффициента аэродинамического сопротивления, коэффициента динамической вязкости от температуры. Для повышения точности расчёта при моделировании процесса охлаждения частицы в газовой среде необходимо совместное решение уравнений движения и теплопереноса, которое учитывает зависимость числа Рейнольдса от температуры, коэффициента C_x от скорости полёта частицы и температуры, коэффициента теплоотдачи α от скорости полёта частицы $V_{ч}$.

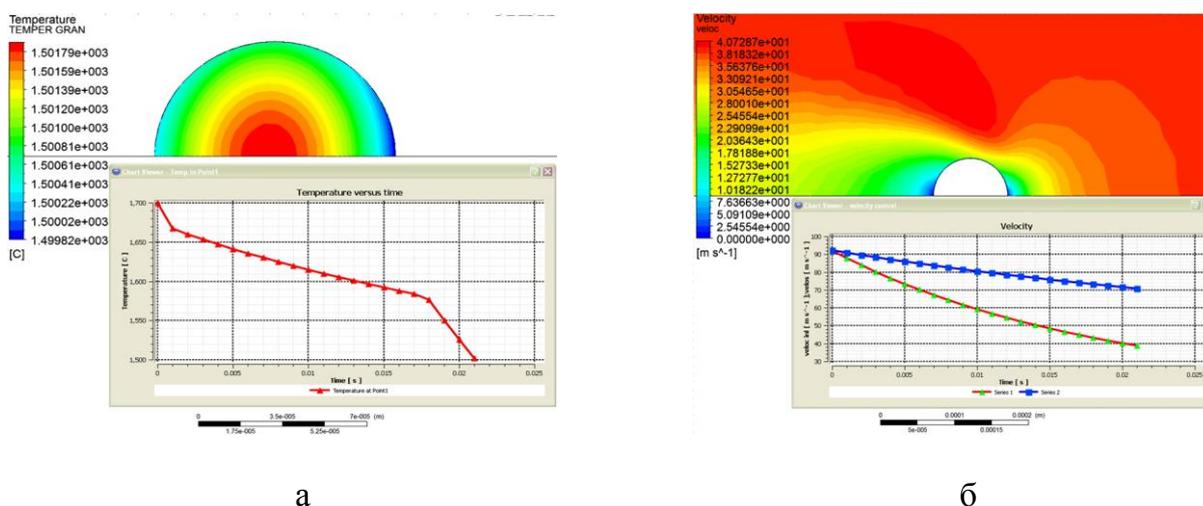


Рис 2. Температурное поле и зависимость изменения температуры частицы от времени (а), графические зависимости скорости полёта частицы от времени (б)

В камере распыления инертная среда охлаждения находится под избыточным давлением. В начале полёта частицы градиент давления больше, плавно уменьшаясь во время полёта. По мере увеличения числа Рейнольдса уменьшается влияние коэффициента динамической вязкости на сопротивление частице, в то же время влияние распределения поля давления возрастает и становится доминирующим.

Таким образом, аэротермодинамическая ММ процесса получения порошка, учитывающая механическое и тепловое взаимодействие между частицей и газовой средой, позволяет прогнозировать значения температуры и скорости полёта частицы в течение всего времени полёта; учитывать влияние температуры на скорость полёта частицы; рассчитывать временные, скоростные характеристики охлаждения частиц распыленного металла в газовой среде.

В разделе 2.5 проведено исследование влияния частоты вращения заготовки, состава газовой смеси, коэффициента турбулентности, давления газовой смеси на процесс охлаждения частицы. Принцип оптимальности процесса получения порошка можно сформулировать следующим образом: определить такие значения искомых параметров (диаметр камеры распыления, частоту вращения заготовки, свойства смеси инертных газов и проч.), которые обеспечили бы получение качественного порошка.

Большой интерес в аэротермодинамической модели представляет исследование влияния состава газовой среды на охлаждение частицы, оценка влияния конвективного и радиационного охлаждения на кристаллизацию. Поиск оптимального решения возможен на основе предлагаемой модели, позволяющей определить такой состав газовой смеси (аргон и гелий), при которой обеспечивается наибольшая скорость во время полёта частицы до столкновения со стенкой. Это обеспечивает большее значение коэффициента теплоотдачи и, следовательно, лучшую интенсивность охлаждения частицы.

Источниками турбулентных явлений в ходе процесса получения порошка методом PREP являются: вращение заготовки с большой частотой вращения, влияние ранее образовавшихся и одновременно летящих частиц, наличие встречных потоков для более интенсивного охлаждения частиц, пульсации частицы. В разработанной ММ наличие области плазмы вблизи торца, образование зон завихрений, других случайных факторов учитывается через коэффициент турбулентности. При моделировании было проведено исследование по влиянию интенсивности турбулентности на коэффициент теплоотдачи. Выявлена чётко положительная корреляция: чем больше степень турбулентности, тем больше коэффициент теплоотдачи, значения которого могут составлять до $7000-8000 \text{ Втм}^{-2} \text{ К}^{-1}$.

Исследование влияния рабочего давления газовой среды на процесс получения порошка методом PREP выполнено на базе аэротермодинамической ММ. Целью расчёта является получение зависимостей температуры частицы, коэффициента теплоотдачи во время полёта частицы при различных давлениях газовой среды: 1.3, 2, 5 и 10 атм. Зависимости изменения температуры частицы от времени с учётом фазового перехода при давлениях в камере распыления 1.3 и 10 атм. приведены на рис. 3. Время кристаллизации частицы при давлении в камере распыления 1.3 атм. составляет 0.011 с (скорость кристаллизации $V_{кр} = 1.1 \cdot 10^4 \text{ °C/c}$), при давлении в камере 10 атм. – 0.0015 с (скорость кристаллизации $V_{кр} = 8.0 \cdot 10^4 \text{ °C/c}$).

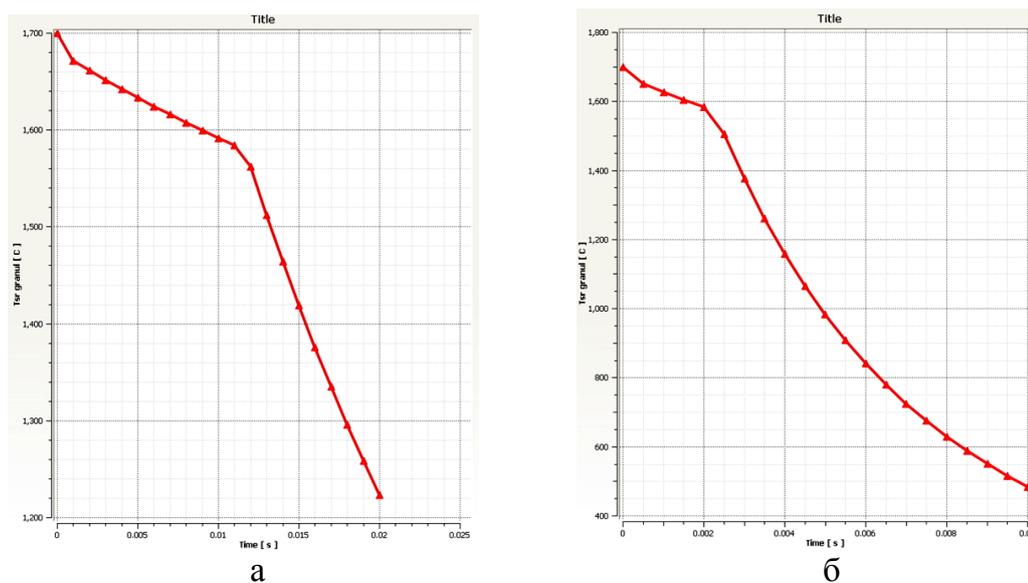


Рис. 3. Зависимость изменения температуры частицы от времени полёта при давлении 1.3 (а) и 10 атм. (б)

Следует отметить, что давление газовой среды оказывает существенное влияние на скорость кристаллизации частиц. При повышении давления до 10 атм. скорость охлаждения повышается в 8 раз. Давление в камере распыления является важнейшим параметром процесса получения порошка методом PREP, влияющим на время кристаллизации частицы в процессе её полёта в газовой смеси.

При проведении процесса при повышенном давлении газовой среды размеры камеры распыления можно сократить. Это уменьшит расход инертной газовой смеси, мощность насосов вакуумной системы и пр., однако установки, работающие под избыточным давлением, являются более сложными для технической реализации.

В разделе 2.6 выполнено моделирование процесса пульсаций поверхности частицы на границе раздела с газовой средой во время полёта. Поверхность частицы после отделения от венца стремится принять равновесную форму под влиянием капиллярных сил, вызванных различными радиусами кривизны на поверхности частицы. Воздействие капиллярных сил на частицу приводит к появлению пульсаций. Происходит перемещение жидкого металла с высокой частотой при достаточно малых размерах капель. При колебаниях происходит отклонение поверхности частицы от сферы. Процесс носит затухающий характер вследствие вязкости материала, при котором частица в итоге приобретает близкую к шаровидной форму.

Известно, что спектр частот колебаний ω жидкого материала определяется по следующей формуле:

$$\omega^2 = \sigma l(l-1)(l+2)/(\rho R^3), \quad (7)$$

где R – радиус эквивалентного по объёму шара, l – число, задающее спектр частот (0, 1, 2, ...n), ρ – плотность, σ – коэффициент поверхностного натяжения. На рис. 4 рассмотрены пульсации на примере титановой частицы. Высокочастотные колебания являются одним из явлений, объясняющих высокий коэффициент теплоотдачи частиц в процессе получения порошка методом PREP. Высокочастотные колебания поверхности и перетекание жидкого металла из одной области в другую способствуют дополнительному охлаждению и формированию однородной структуры частицы без газовых включений.

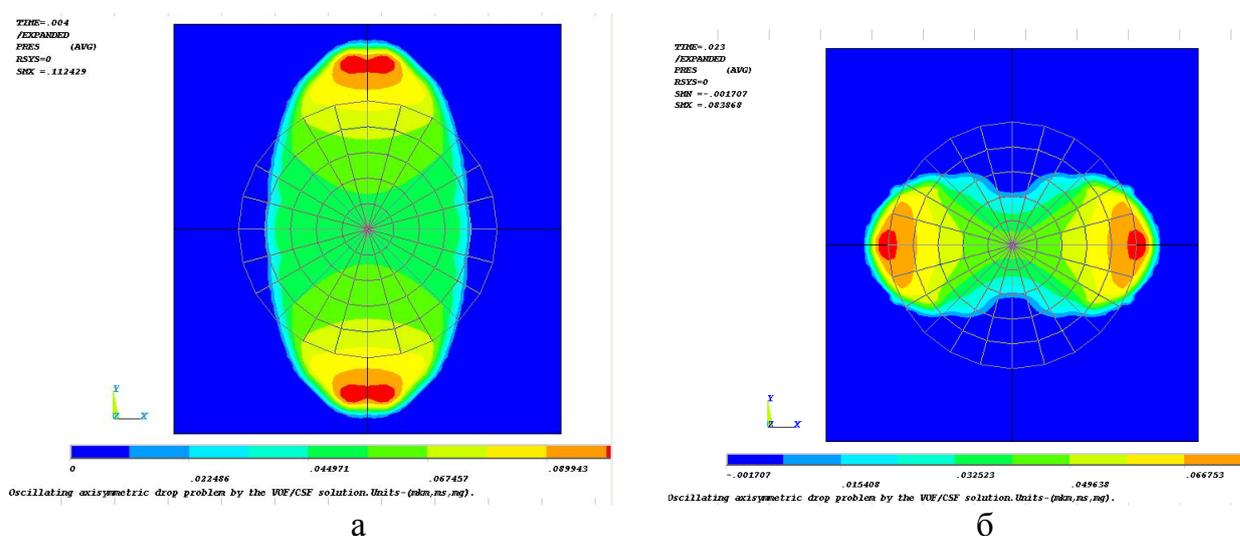


Рис. 4. Распределение вектора скоростей движения жидкого металла и давления в момент времени 0.024 мс

При скоростях 1-3 м/с поверхность частицы имеет период колебаний $T = 0.048$ мс, что соответствует частоте 21 кГц. Скорость затухания колебаний пропорциональна коэффициенту динамической вязкости μ . Чем больше значение μ исследуемого материала частицы, тем выше скорость затухания колебаний.

В разделе 2.7 выполнено моделирование процесса получения порошка на специализированной технологической установке, оснащённой камерой распыления, механизмом вращения заготовки, узлом подачи газовой смеси, источником плазменного нагрева, системой водяного охлаждения стенок камеры.

Модель реализована в рамках программного комплекса ANSYS CFX. В данной модели химический состав газовой среды составляет (% масс.): 90 гелия и 10 аргона, что обеспечивает для частиц наиболее благоприятный режим охлаждения частиц и устойчивость дугового разряда плазмы. Задачей моделирования является исследование скорости движения газовой смеси в камере распыления, режимов охлаждения стенок камеры. Газовая смесь подаётся в камеру распыления через отверстие диаметром 140 мм, расположенное соосно с заготовкой. Через это же отверстие факел плазмы подаётся на торец заготовки с эксцентриситетом 20 мм. Поле скоростей газовой смеси и распределение коэффициента теплоотдачи от источников тепла к газовой смеси около поверхности заготовки приведены соответственно на рис. 5а и 5б.

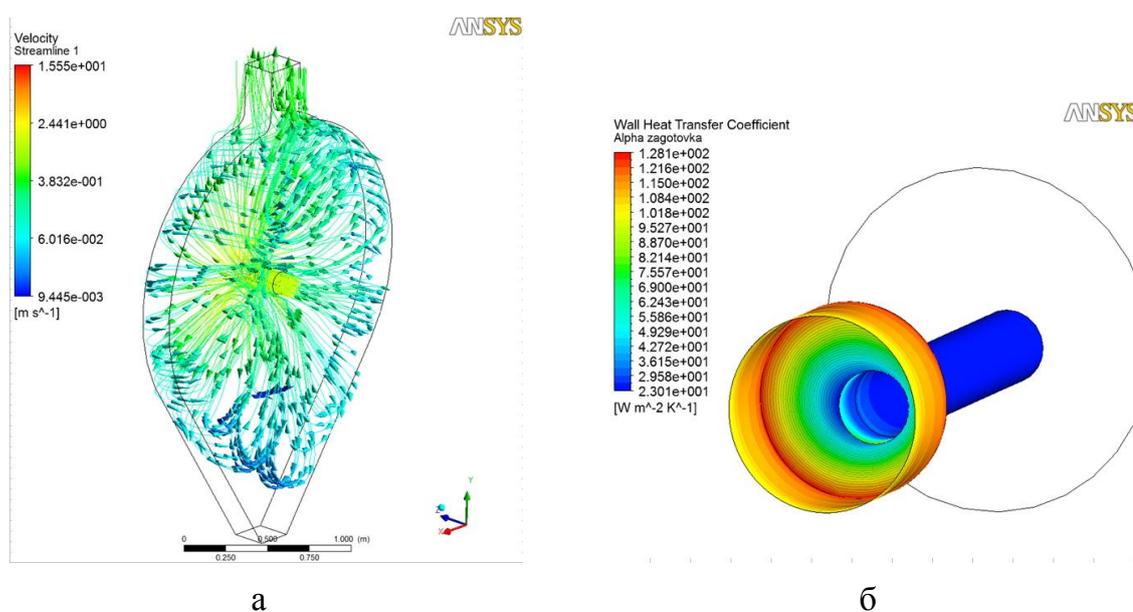


Рис. 5. Поле скоростей газовой смеси (а) и распределение коэффициента теплоотдачи около поверхности заготовки (б)

Знание скорости охлаждения помогает выбрать:

- оптимальные значения конструктивных параметров специализированного оборудования (диаметр камеры распыления, расположение спреера для организации дополнительного конвективного охлаждения, диаметр форсунок и проч.);
- химический состав и температуру газовой смеси на входе, определяемые мощностью холодильного агрегата.

Известно, что метод PREP, обеспечивающий получение плотных безгазовых частиц шарообразной формы, включает в себя следующие этапы: формирование тонкой плёнки расплавленного металла размером 20-50 мкм на торце заготовки вследствие воздействия плазмы, движение жидкого металла к периферийной обогреваемой поверхности заготовки и образование венца, перетекание расплава к

венцу, отрыв частиц от венца при превышении сил центробежного ускорения по сравнению с силами поверхностного натяжения.

Приведённый механизм показывает, что на первом этапе (формирование частицы до момента её отделения от венца) её взаимодействие с газовой средой практически отсутствует. Результаты моделирования процесса отрыва частицы от венца вращающейся заготовки приведены на рис. 6. Скорость вращения заготовки – 20000 об/мин, материал – титан.

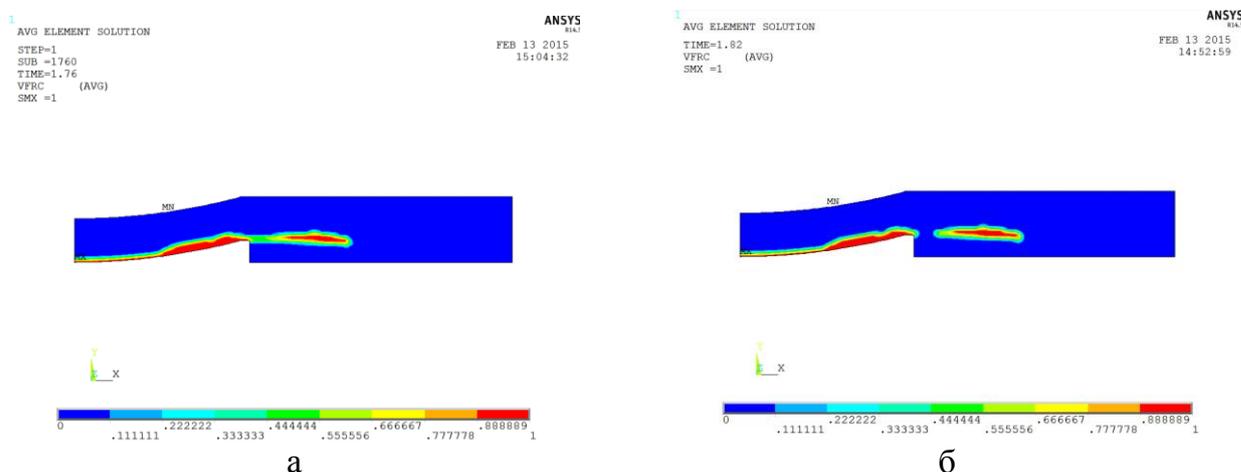


Рис. 6. Положение частицы в различные моменты времени

Из рис. 6 следует, что от венца заготовки отрывается частица сложной геометрической формы, имеющая на поверхности несколько радиусов кривизны. Вследствие пульсаций происходит перемещение жидкого металла с высокой частотой, после чего частица приобретает близкую к шаровидной форму.

Таким образом, разработанные ММ позволяют прогнозировать важнейшие параметры процесса получения порошка методом PREP: вектор скоростей газовой смеси, распределение коэффициентов теплоотдачи от источников тепла к газовой смеси, температурное поле газовой смеси. Модели также позволяют конструктору выбирать оптимальный режим охлаждения стенок камеры распыления и обоснованно назначать геометрические размеры при проектировании специализированного технологического оборудования.

Третья глава посвящена разработке математической модели процесса послойного синтеза изделий электронным лучом. Предлагаемый подход включает модель взаимодействия сканирующего электронного луча с изделием и модель процессов тепло- и массопереноса при синтезе изделия. Первая модель рассчитывает мощность луча, удельную энергию, распределение удельной поверхностной мощности на поверхности слоя порошка. Во второй ММ решается система, состоящая из уравнений тепло- и массообмена: передачи энергии, движения (уравнение Навье-Стокса), неразрывности.

В разделе 3.1 при моделировании источника теплоты от воздействия электронного луча особое значение имеет распределение удельной поверхностной мощности на поверхности слоя порошка. При численном моделировании упрощение свойств источника теплоты приводит к погрешностям. Это касается корректного выбора типа пространственного распределения удельной мощности луча по поверхности порошка. В работе рассмотрено: нормальное гауссовское распределение, усечённое гауссовское распределение и β -распределение.

Гауссовское распределение удельной мощности электронного луча $q_g(r)$ представляют в следующем виде:

$$q_g(r) = q_o \exp\left(-\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right), \quad (8)$$

где r – текущее значение радиуса пучка, r_o – радиус пучка в месте его встречи с объектом, q_o – максимальная удельная мощность центральной точке при $r = 0$. Такое распределение характеризуется амплитудным значением в центре пятна взаимодействия луча с мишенью и неограниченностью распределения удельной мощности по радиусу.

В общем виде, мощность луча можно представить как двойной интеграл по площади воздействия:

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} q_o \cdot e^{-\left(\frac{r}{r_o}\right)^2} r dr d\alpha = \pi r_o^2 q_o, \quad (9)$$

Если принять, что удельная мощность электронного луча распределяется по кругу с радиусом r_k , то можно говорить об усечённом гауссовском распределении, которое характеризуется скачкообразным переходом удельной мощности при конечном радиусе распределения r_k . В этом случае, основной задачей является перераспределение общей мощности на площадь круга с радиусом r_k , что приводит к увеличению амплитудного значения удельной мощности в центре.

В этом случае мощность луча определяется как:

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_k} q_o \cdot e^{-\left(\frac{r}{r_o}\right)^2} r dr d\alpha = \pi r_o^2 \cdot q_o \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{r_k}{r_o}\right)^2\right)\right], \quad (10)$$

Также рассмотрено β -распределение удельной мощности по площади воздействия электронного луча на поверхность подложки:

$$q(r) = q_m \left(1 - \left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right)^\beta, \quad (11)$$

где q_m – максимальная удельная мощность в центральной точке круга, β – показатель степени ($\beta > 1$, чтобы $\frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=r_o} = 0$).

Особенностью β -распределения удельной поверхностной мощности электронного луча q_β является монотонное плавное уменьшение от максимального значения в центре круга до нуля при $r = r_o$:

$$q_\beta(r) = q_m \left(1 - \left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right)^\beta. \quad (12)$$

Удельная мощность луча при β -распределении в любой точке области воздействия луча с радиусом r_i может быть рассчитана по следующей формуле:

$$q_\beta(r_i) = \frac{(\beta + 1) \cdot W}{\pi r_o^2} \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2\right)^\beta. \quad (13)$$

При сканировании поверхности электронным лучом происходит наложение тепловых источников. Распределение источников тепла по различным законам приведено на рис. 7: усечённое гауссовское распределение (3 – суммирующая зависимость, 4 – первый и 5 – второй тепловые источники), β -распределение (1 – первый и 2 – второй тепловые источники, 6 – суммирующая зависимость).

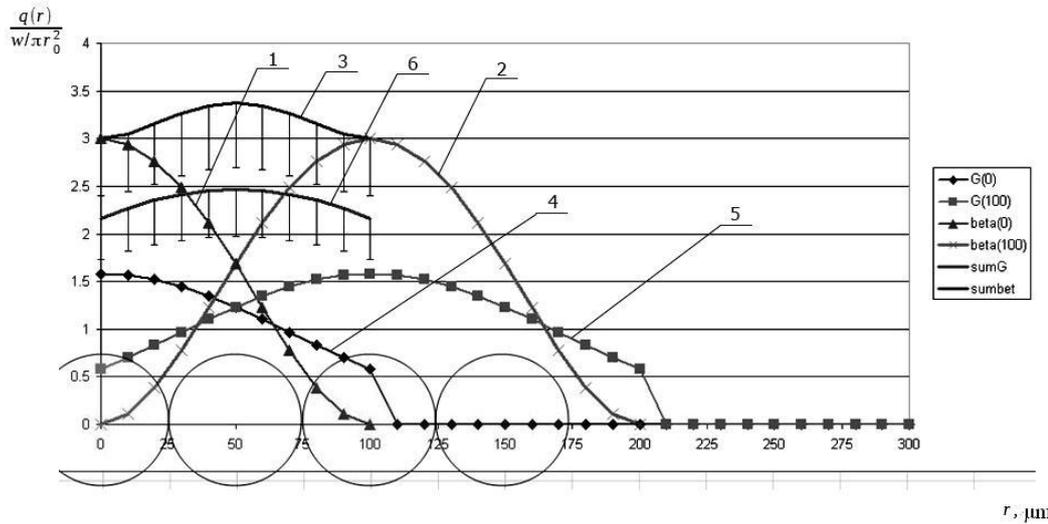


Рис. 7. Типы пространственного распределения удельной мощности луча диаметром 0.2 мм по поверхности порошка при синтезе изделий электронным лучом

Процесс распространения тепла при действии сканирующего по поверхности луча от нормально кругового источника с мощностью q , перемещающегося по поверхности со скоростью $V_{ск}$, описывается известным дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - c(T) V_x \frac{\partial T}{\partial x} - c(T) V_y \frac{\partial T}{\partial y} - c(T) V_z \frac{\partial T}{\partial z} + q, \quad (14)$$

где T – температура; t – время; V_x , V_y , V_z – проекции вектора скорости быстро движущегося источника тепла по осям X , Y и Z ; $c(T)$ и $\lambda(T)$ – соответственно теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала.

Температурное поле при нагреве и теплота фазового перехода, выделяющаяся на границе плавления (кристаллизации), описываются двухфазной задачей Стефана:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda_1 \text{grad} T) + f_1 - \delta_s L V_n, \quad T < T^*, \quad (15)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda_2 \text{grad} T) + f_2 - \delta_s L V_n, \quad T > T^*, \quad (16)$$

где c_1 , c_2 – теплоемкость материала соответственно в жидком и твердом состояниях; λ_1 , λ_2 – коэффициент теплопроводности материала соответственно в жидком и твердом состояниях; ρ_1 , ρ_2 – плотность материала соответственно в жидком и твердом состояниях; f_1 , f_2 – плотности тепловых источников; δ_s – поверхностная δ -функция; V_n – скорость движения границы фазового перехода по нормали; T^* – температура фазового перехода; L – энтальпия фазового перехода.

Нагрев поверхности слоя порошка происходит сверху электронным лучом. Поскольку объектом плавления является порошок сферической формы, то поверхность раздела двух сред искривлена, вследствие чего возникает движение жидкости. Поверхность жидкого металла стремится принять равновесную форму под влиянием силы тяжести и сил поверхностного натяжения. Неравномерность температурного поля приводит к сложным термокапиллярным течениям. Зависимость поверхностного натяжения от температуры, или эффект Марангони, создает существенное возмущение, особенно в вакууме.

С учётом действия силы Марангони, приводящей к перемешиванию расплава от центра к краям слоя, дифференциальное уравнение движения жидкости в области расплавленного слоя принято записывать как:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v, \nabla)v = g - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \frac{\mu}{3\rho} \text{grad} \text{div} v + \frac{\mu}{\rho} \Delta v - \sigma R \delta(\varphi) \nabla \varphi, \quad (17)$$

где ρ – плотность, p – давление, σ – коэффициент поверхностного натяжения, μ – коэффициент динамической вязкости, $v = (v_x, v_y, v_z)$ – вектор эффективной скорости расплава, R – искривление линии раздела двух фаз, φ – расстояние от текущей линии раздела двух фаз до нулевого интерфейса, $\delta(\varphi)$ – волновая функция.

Последняя составляющая уравнения (17) позволяет учесть волновой характер процессов, сопровождающих движение в расплавленном слое порошка для свободной поверхности, разделяющей поверхности двух фаз: жидкости и вакуумного пространства.

Уравнение неразрывности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (18)$$

Разработанная численная ММ процесса СИЭЛ, учитывающая фазовые переходы при воздействии на металл электронным лучом, позволяет:

- рассчитать тепловую нагрузку на поверхность порошка и время её приложения для достижения необходимого температурного поля в исследуемой системе «слой порошка – изделие – подложка»;
- исследовать движение жидкого металла, оценить погрешность размерной обработки, усадку слоя, вероятность возникновения пор в случае большей скорости кристаллизации металла по сравнению со временем растекания порошка;
- прогнозировать структуру изделия.

Задача, описывающая нагрев и плавление порошка электронным лучом, является нелинейной вследствие зависимости теплофизических параметров от температуры. Модель, реализованная на базе метода конечных элементов, учитывает геометрическую форму синтезируемого изделия, зависимость теплофизических параметров от температуры, энтальпию фазового перехода при плавлении и кристаллизации порошка.

В разделе 3.2 выполнено моделирование процесса послойного синтеза изделий из порошка сплава ВТ-6 и решены следующие задачи:

- определение температурного поля при сканировании поверхности подложки электронным лучом,
- перемещение зоны твердо-жидкого состояния в слое из порошка при электронно-лучевом воздействии (задача Стефана),
- растекание расплавленного порошка по поверхности подложки.

Моделирование процесса теплопереноса при сканировании поверхности подложки и изделия электронным лучом периодического действия выполнено в среде программного комплекса ANSYS. Способ сканирования электронного луча по поверхности показан на рис. 8а, где изображен объём элементарной ячейки. Температурное поле на верхней поверхности во время второго прохода электронного луча над элементом показано на рис. 8б.

Следует отметить, что алгоритм способа нагрева подложки/изделия для минимизации температурных деформаций при синтезе крупногабаритных изделий может быть значительно сложнее. Например, нагрев поверхности выполняется

последовательным заполнением малых фигур по всей площади текущего сечения изделия. Проведённый расчёт температурного поля позволяет описывать процесс электронно-лучевого нагрева изделий в вакуумной среде с учётом передачи тепла посредством излучения. В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench, пространственный режим – 3D, режим расчета – динамический, тепловой режим – неадиабатный.

При моделировании исследовали несколько режимов электронно-лучевой обработки при постоянном ускоряющем напряжении 60 кВ. Модель учитывает историю предыдущих периодических тепловых воздействий электронного луча. Нестационарный тепловой расчёт позволяет определить температурное поле, изменяющееся во времени. В ходе процесса СИЭЛ важным параметром является размерное формирование синтезируемого слоя, формирование управляемого сплавления текущего слоя с предыдущим.

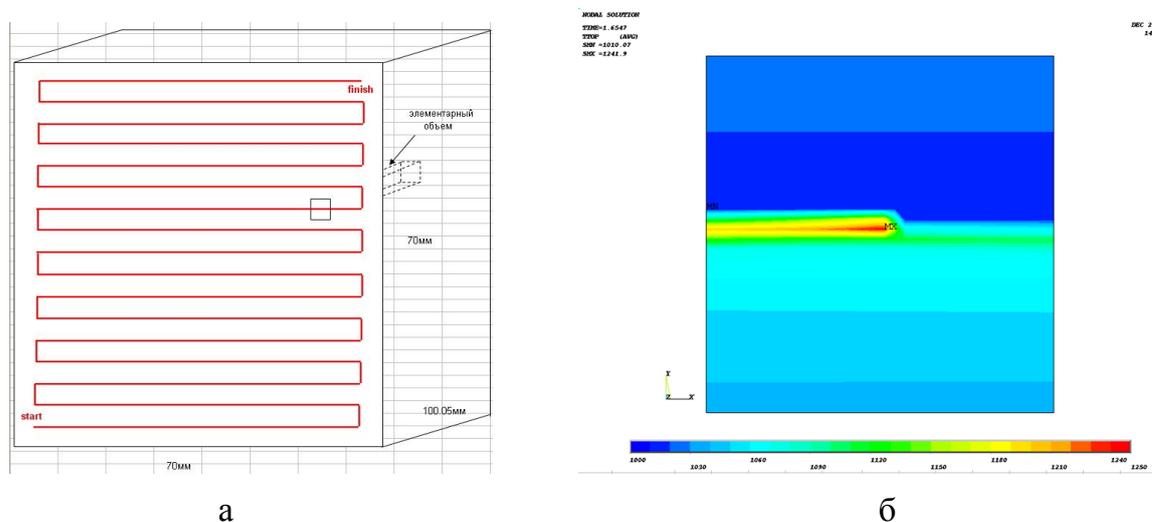


Рис. 8. Способ сканирования электронного луча по поверхности (а) и температурное поле на верхней поверхности во время второго прохода электронного луча (б)

Решение задачи Стефана позволяет определить важнейшие параметры процесса СИЭЛ (скорости нагрева и охлаждения слоя порошка, время плавления и кристаллизации порошка, перемещение границы твёрдо-жидкой зоны в слое при электронно-лучевом воздействии), которые определяют структуру изделия. При мощности луча 1200 Вт скорость нагрева верхней поверхности слоя титанового порошка в диапазоне температур 1400-2120 °С составляет $3.6 \cdot 10^6$ °С/с, для нижней поверхности в диапазоне температур 1400-1600 °С – скорость нагрева равна $1 \cdot 10^6$ °С/с (рис. 9а). На флажке рис. 9б указана температура поверхности соприкосновения порошка с уже сплавленной структурой.

Гидродинамическая модель позволяет рассчитать временные и скоростные характеристики течения жидкого металла верхнего слоя порошка. При воздействии электронным лучом на слой порошка происходит плавление, течение жидкого металла до полного заполнения пор в верхнем слое. При моделировании используется элемент FLUID141 программного пакета ANSYS FLOTRAN, описывающий жидкие и твердые области нестационарных тепловых систем. Получены временные зависимости растекания жидкого порошка по форме и вектору скорости.

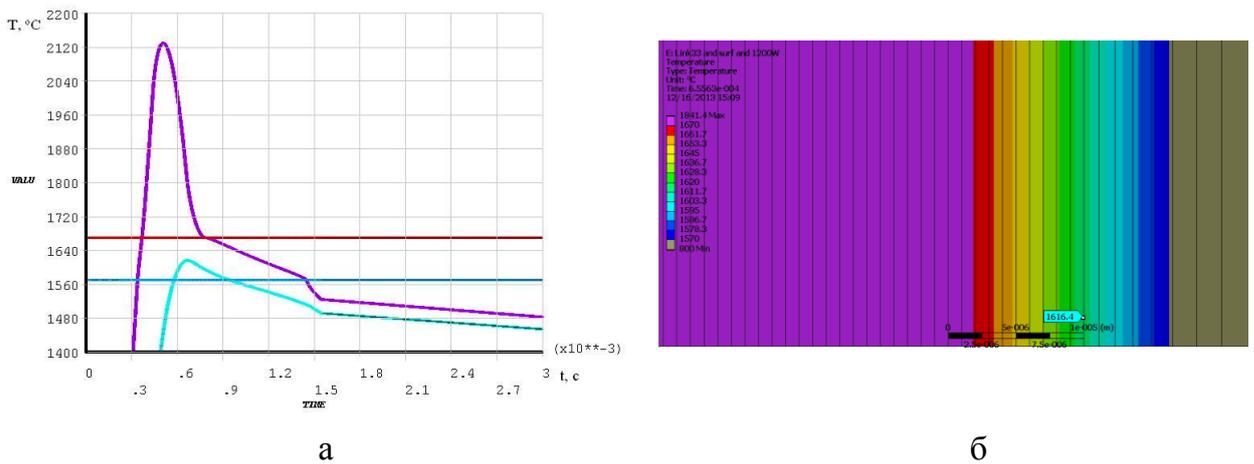


Рис. 9. Динамика изменения температур на верхней и нижней границах слоя порошка (а) и глубина фазового перехода (б) после первого воздействия электронного луча мощностью 1200 Вт

Динамика движения частиц из титанового сплава ВТ6 в жидком состоянии в различные моменты времени приведена на рис. 10, на котором показано не только изменение формы порошка, но и вектор скоростей.

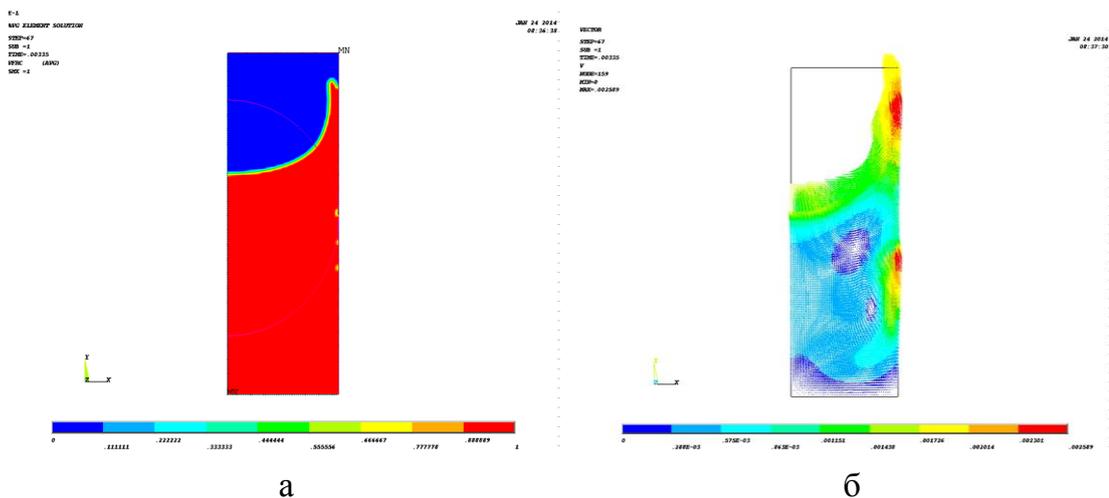


Рис. 10. Изменение формы порошка (а) и вектора скоростей частиц порошка (б) в момент времени 0.00335 с

Процесс переноса жидкого металла в зоне плавления оказывает значительное влияние на формирование размеров и структуры изделия. Время растекания жидкого металла меньше времени кристаллизации верхнего слоя порошка, следовательно, происходит полное заполнение пор. Существенное влияние на скорость движения жидкого металла и время заполнения пор оказывают: зависимость вязкости от температуры, в большей степени, и коэффициент поверхностного натяжения, в меньшей степени. Поэтому в расчётах необходимо учитывать зависимость данных параметров от температуры.

Таким образом, численное моделирование процесса синтеза изделия из порошка титанового сплава ВТ6 позволило получить скорости нагрева и охлаждения элементарной ячейки, глубину проплавления, скорость перемещения твёрдо-жидкой границы в слое порошка; температурное поле синтезируемого изделия и подложки; формулы для расчёта приращения глубины проплавления в

зависимости от номера воздействия электронного луча; формулы для расчёта скорости изменения глубины проплавления.

К числу важнейших вопросов, которые необходимо решить для проектирования технологии процесса СИЭЛ, относятся выбор последовательности операций и расчёт режимов обработки поверхности электронным лучом на всех операциях. Вектор искомых параметров процесса СИЭЛ разделяется на три группы параметров:

- структурные (последовательность технологических операций нанесения порошка данного химического состава, термической обработки слоя, плавления слоя);
- технологические (режим обработки: ток луча $I_{л}$, диаметр пятна на мишени d_0 , скорость сканирования луча $V_{ск}$);
- геометрические (способ сканирования луча, циклы сканирования, шаг смещения луча при сканировании $s_{см}$);

Кроме этого, операции электронно-лучевой обработки характеризуются совокупностью фазовых параметров, которые являются функциями искомых параметров, и рассчитываются на базе ММ (скорость нагрева и охлаждения слоя порошка, глубина проплава, температурное поле синтезируемого изделия и подложки). Качество изделия определяется по количеству пор, структуре изделия, механическим и теплофизическим свойствам.

В работе рассмотрена параметрическая оптимизация операции плавления слоя порошка из титанового сплава ВТ6. Расчёт режимов обработки для процесса СИЭЛ осуществляется на базе ММ, построенной с учётом процессов тепло- и массопереноса при формировании изделия. При оптимизации операции необходимо определить значения вектора варьируемых параметров (ток луча $I_{л}$, диаметр пятна на мишени d_0 , скорость сканирования луча $V_{ск}$, способ сканирования луча, шаг смещения луча при сканировании $s_{см}$), которые обеспечивают надёжное сплавление текущего слоя порошка с предыдущим, формируют необходимую структуру изделия.

Оптимальные значения вектора искомых параметров X рассчитываются с учётом вектора критериев оптимизации (K). В качестве частных критериев оптимизации, оценивающих процесс технологической операции плавления слоя порошка, приняты время синтеза слоя изделия и энергетические затраты операции.

Используя генератор ЛП - последовательностей рассчитываем координаты точек Q_1, Q_2, \dots, Q_m в пространстве допустимых решений, удовлетворяющих параметрическим и функциональным ограничениям. Для каждой точки определяем критерии. При выборе окончательного оптимального решения большое значение имеет вес каждого критерия. Для поиска оптимальных значений параметров технологического процесса используются алгоритмы динамического программирования. Набор критериев в зависимости от выбранной модели может быть любым.

В четвертой главе представлены результаты получения композиционных изделий из порошков сплава ВТ6 и молибдена, полученных по технологии послойного синтеза. Из общего объема используемых в авиационной и космической промышленности сплавов на основе титана, на сплав марки ВТ6 приходится более 50 %. Сплав применяется для изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов, баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур и целого ряда других изделий. Для обеспечения защиты таких деталей и получения необходимых механических и теплофизических свойств целесообразно формировать

поверхностные слои из порошка молибдена, которые отличаются высокой твердостью, износостойкостью, стойкостью к абразивному воздействию и эрозии.

В работе выполнено исследование механических и эксплуатационных свойств порошкового титанового сплава ВТ6, полученного по технологии СИЭЛ. Испытания проведены в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории «Исследование и Моделирование Структуры и Свойств Металлических Материалов» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Определены механические характеристики, шероховатость поверхности и износостойкость сплава.

Твердость образца, полученного методом послойного электронно-лучевого синтеза из порошка титанового сплава ВТ6, измеряли на универсальном твердомере фирмы Zwick//Roell модель ZHU тип 8187.5. Величину твердости HV оценивали по нормальному усилию F_{max} на индентор (10 кгс) и площади отпечатка A_p согласно ГОСТ 2999-59. Установлено, что твердость по всем слоям порошкового сплава ВТ6 как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях имеет незначительные разбросы и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к компактному сплаву.

Механические свойства определяли при испытаниях на растяжение согласно ГОСТ 1497-84 на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 с максимальным усилием 10 тс. Механические характеристики порошкового сплава ВТ6 составляют: условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 740-760$ МПа, временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 840-870$ МПа, относительное удлинение $\delta = 2-3$ %.

Испытания на ударную вязкость проводили на маятниковом копре Zwick//Roell RKP 450 с запасенной энергией 450 Дж согласно ГОСТ 9454-78. Использовали образцы с U-образным надрезом тип I. В результате испытаний получены значения: работа деформации и разрушения $KU = 34.2$ Дж, ударная вязкость $KCU = 42.5$ Дж/см².

Исследование шероховатости лицевой поверхности порошковых изделий, полученных по ТПСИ, проводили с помощью сканирующего интерференционного микроскопа ZYGO NewView 7300. На рис. 11а и 11б приведены соответственно изображения фронтальной и нижней поверхностей образца размерами 100 x 100 x 3 мм.

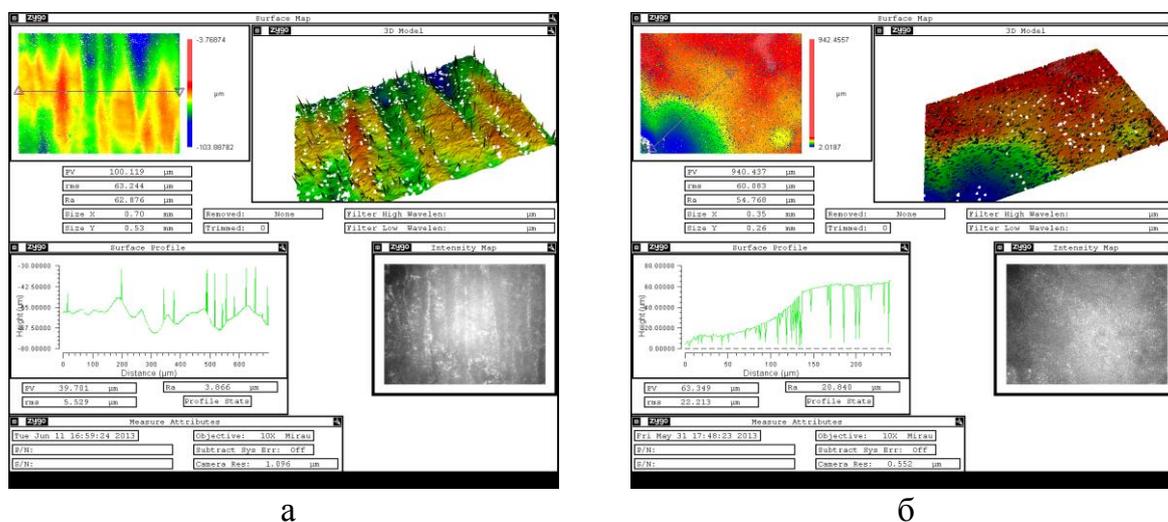


Рис. 11. Исследование лицевой (а) и нижней (б) поверхностей образца сплава ВТ6, полученного электронно-лучевым синтезом

В цветовом представлении хорошо виден нерегулярный рельеф образца и поры (PV – максимальное отклонение в мкм, rsm – среднеквадратичное отклонение в мкм, Ra – шероховатость в мкм, size X – размер исследуемой области по оси X в мм, size Y – размер исследуемой области по оси Y в мм).

Проведены исследования образцов, полученных по технологиям газостатического прессования и электронно-лучевого синтеза, на износостойкость (линейная и объёмная интенсивность изнашивания, линейный износ за цикл, скорость изнашивания). Скорость изнашивания образца, полученного по технологии электронно-лучевого синтеза, в ~1.5 раза меньше по сравнению с образцом, полученным по технологии газостатического прессования.

Технологическая схема, представленная на рис. 12, показывает последовательность получения композиционного изделия из порошка титанового сплава ВТ6 и молибдена с использованием методов послойного синтеза и вакуумной пайки. Последовательность получения образцов включала следующие основные технологические операции:

1. Синтез образца из порошка титанового сплава ВТ6 размером 10x10x15 мм. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с, ток луча 17 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па.
2. Нанесение слоя порошков из молибдена (85 %, масс.) и титана (15 %, масс.) на переднюю поверхность образца.
3. Спекание слоя из порошков молибдена и титана на поверхности образца из ВТ6. Режим обработки: максимальная температура нагрева 900 °С, давление в рабочей камере $6 \cdot 10^{-3}$ Па.
4. Электронно-лучевая обработка слоя из порошков молибдена и титана (вакуумная пайка молибдена и титана). Режим обработки: скорость перемещения луча 3200 мм/с, ток луча 22 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

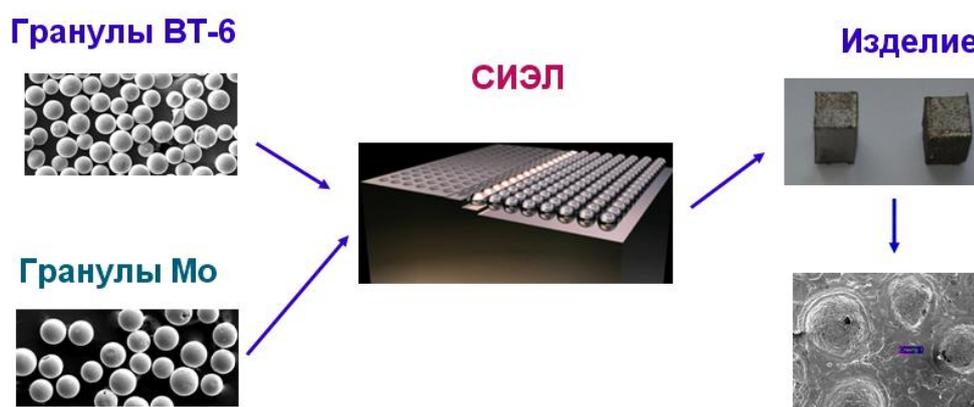


Рис. 12. Технологическая схема получения образцов из порошков сплава ВТ6 и молибдена на базе методов послойного синтеза и пайки

При проведении процесса электронно-лучевого синтеза изделий необходим правильный выбор параметров режима обработки, главным образом, скорости сканирования и тока луча, от которых зависит уровень остаточных напряжений, ориентация кристаллов материала, форма границ зерен.

Изображение образца, полученного из порошков сплава ВТ6 и молибдена на базе методов послойного синтеза и пайки, представлено на рис. 13. Для

химического микроанализа образца использовали энергодисперсионный спектрометр INCA Energy++ фирмы Oxford Instruments.

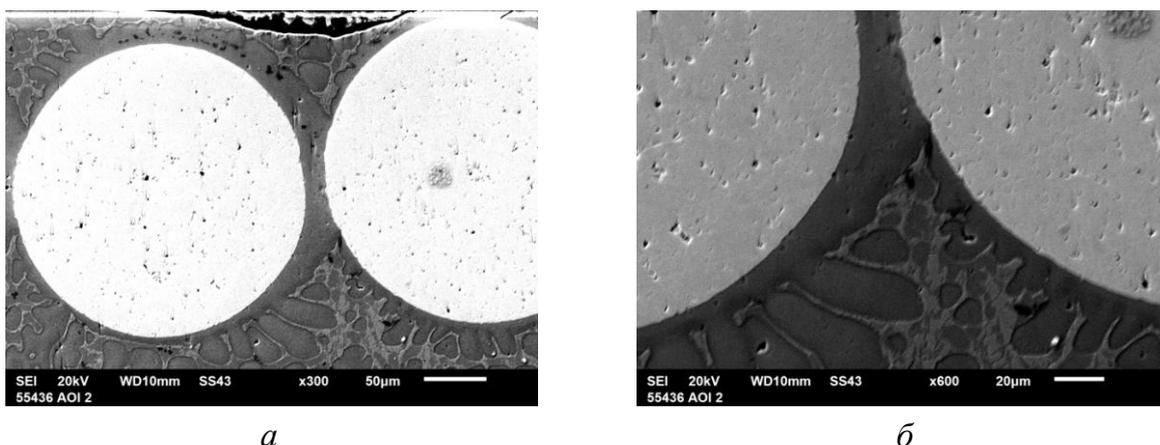


Рис. 13. Изображение при разных увеличениях поверхности образца, полученного из порошков сплава ВТ6 и молибдена на базе методов послойного синтеза и пайки

Из порошков тугоплавких металлов можно получать особо стойкие покрытия на основе оксидов, карбидов, нитридов, а также создавать композиционные матрицы и получать материалы с заранее заданными характеристиками. Иллюстрация такого подхода приведена на рис. 14, на котором показан процесс синтеза слоя оксида молибдена на образец, полученный методом электронно-лучевого синтеза из порошка титанового сплава ВТ6.

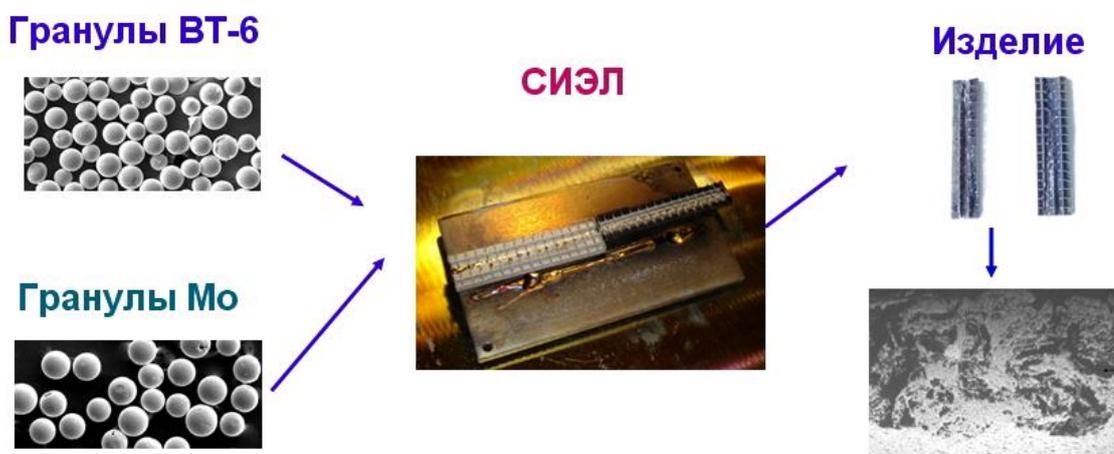


Рис. 14. Технологическая схема получения образцов из порошков сплава ВТ6 и оксида молибдена на базе метода электронно-лучевого синтеза

В процессе получения образцов были проведены следующие технологические операции:

1. Синтез образца из порошка титанового сплава ВТ6 размером 10x70x3 мм. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с, ток луча 19 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па.
2. Спекание слоя порошка молибдена в среде кислорода.
3. Электронно-лучевая обработка слоя порошка из оксида молибдена. Режим обработки: скорость перемещения луча 900 мм/с, ток луча 14 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-2}$ Па.

Операцию синтеза порошка оксида молибдена на титановые образцы осуществляли на электронно-лучевой установке типа «СЭЛС-1» (изготовитель – ОАО «Электромеханика», г. Ржев).

Опытные образцы получали с использованием методов послойного электронно-лучевого синтеза и плазменного нанесения порошковых покрытий. На первом этапе методом послойного электронно-лучевого синтеза получали образцы из порошка титанового сплава ВТ6. На втором этапе – на образцы наносили слой из порошка молибдена методом плазменного напыления.

Были получены опытные порошковые композиционные изделия, изготовленные на базе гибридной технологии, сочетающей различные методы послойного формирования изделия: электронно-лучевой синтез, электронно-лучевое напыление. Для формирования матрицы изделия наиболее эффективным является метод электронно-лучевого плавления, который обеспечивает высокую производительность процесса; для получения демпфирующих, дисперсно-упрочняющих и керамических слоёв толщиной от единиц нанометров до десятков микрон с целью придания материалу необходимых свойств (жаропрочность, жаростойкость, прочность и др.) – метод электронно-лучевого напыления.

Технология получения композиционных изделий методом электронно-лучевого синтеза и напыления включала следующие основные операции:

1. Синтез образца из порошка титанового сплава ВТ6. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с, ток луча 17 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па.
2. Нанесение слоя порошков из молибдена (85 %, масс.) и титана (15 %, масс.) на переднюю поверхность образца.
3. Спекание слоя из порошков молибдена и титана на поверхности образца из ВТ6. Режим обработки: максимальная температура нагрева 900 °С, давление в рабочей камере $6 \cdot 10^{-3}$ Па.
4. Электронно-лучевая обработка слоя из порошков молибдена и титана (вакуумная пайка молибдена и титана). Режим обработки: скорость перемещения луча 3200 мм/с, ток луча 22 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1 \cdot 10^{-2}$ Па.
5. Нагрев образца до температуры 800 °С.
6. Синтез керамического слоя из оксидов циркония и иттрия (в % масс: 92 ZrO₂ + 8 Y₂O₃) методом электронно-лучевого напыления. Режим обработки: ток луча для нагрева изделий до температуры 900 °С – 0.9 А, время нагрева изделий 15 мин, ток электронных пушек испарения 2 А, ускоряющее напряжение 20 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-2}$ Па, время напыления 70 мин.

Увеличенное изображение поверхности композиционного изделия, полученного из порошков сплава ВТ6 и молибдена на базе методов послойного синтеза и пайки, электронно-лучевого напыления керамического слоя 92ZrO₂ + 8Y₂O₃, представлено на рис. 15а.

Последовательность получения образцов с геометрическими размерами 20x20x15 мм с другим поверхностным слоем включала следующие технологические основные операции:

1. Синтез образца из порошка титанового сплава ВТ6. Режим обработки: скорость перемещения луча 4530 мм/с, ток луча 17 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па.
2. Нагрев образца до температуры 800 °С.

3. Синтез металлического слоя из сплава никеля, кобальта, хрома, алюминия и иттрия (NiCoCrAlY). Режим обработки: ток луча 2.5 А, ускоряющее напряжение 20 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-2}$ Па, время напыления 30 мин.
4. Синтез керамического слоя из оксидов циркония и иттрия (в % масс.: $92\text{ZrO}_2 + 8\text{Y}_2\text{O}_3$) методом электронно-лучевого напыления. Режим обработки: ток луча 2 А, ускоряющее напряжение 20 кВ, давление в рабочей камере $1.3 \cdot 10^{-2}$ Па, время напыления 40 мин.

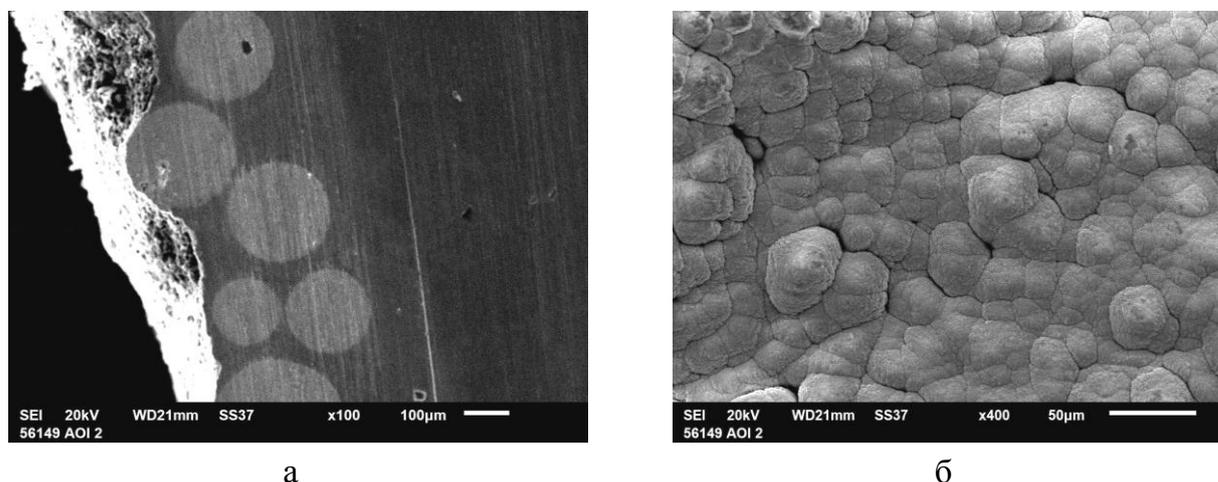


Рис. 15. Композиционное изделие из порошков сплава ВТ6, молибдена и керамического слоя (в % масс.) $92\text{ZrO}_2 + 8\text{Y}_2\text{O}_3$ (а), образец, полученный из порошка титанового сплава ВТ6 методом послойного синтеза и методом электронно-лучевого напыления металлического NiCoCrAlY и керамического $92\text{ZrO}_2 + 8\text{Y}_2\text{O}_3$ слоя (б)

Изображение поверхности композиционного изделия, полученного из порошков сплава ВТ6 по технологии послойного электронно-лучевого синтеза, металлического слоя из сплава NiCoCrAlY и керамического слоя из (в % масс.) $92\text{ZrO}_2 + 8\text{Y}_2\text{O}_3$, сформированных методом электронно-лучевого напыления, представлено на рис. 15б.

При изготовлении композиционных изделий по технологии послойного синтеза использовали отечественное специализированное оборудование типа «УЭ-175» (изготовитель: ОАО «Электромеханика»).

В пятой главе разработана классификация специализированного технологического оборудования для реализации операции послойного синтеза электронным лучом, приведены новые конструкторские решения установок для синтеза изделий. Конструкция технологической установки для послойного синтеза изделий зависит от способа подачи и устройства хранения порошка, схемы формирования различных сочетаний порошка, способа формирования горизонтального слоя из порошка различного химического состава, устройства хранения порошка, способа подачи порошка.

Рассмотрены схемные решения специализированного оборудования для получения порошковых и композиционных изделий различного химического состава с программируемой структурой методами послойного электронно-лучевого плавления/спекания, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления, ионно-имплантационной модификации поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов.

В разделе 5.1 приведена схема вакуумной установки «СИЭЛ-3», предназначенной для получения изделий с программируемой структурой из порошка различного химического состава методом послойного электронно-лучевого синтеза. К особенностям данного конструкторского решения следует отнести наличие двух револьверных головок с наборами бункеров-питателей и шаблонов. К основным элементам установки относятся следующие узлы и механизмы (рис. 16): вакуумная камера 1, электронно-лучевая пушка 2, вакуумная система 7, высоковольтный источник питания 8, система управления 9, система водяного охлаждения 10, рабочий стол 17, револьверный механизм 15 с бункерами-питателями, револьверный механизм 12 с шаблонами.

Электронно-оптическая система пушки 2, формирующая луч электронов с заданными параметрами, состоит из катода 3, анода 4, фокусирующей электромагнитной линзы 5 и отклоняющей электромагнитной линзы 6.

Стол 17 предназначен для размещения подложки, перемещения синтезируемого изделия. Механизм вертикального перемещения изделия, который обеспечивает в технологическом цикле периодическое перемещение подложки на величину спекаемого слоя, реализован на базе актуатора 18 (линейного механизма, включающего в себя линейные направляющие и шариковинтовую пару), электрического двигателя.

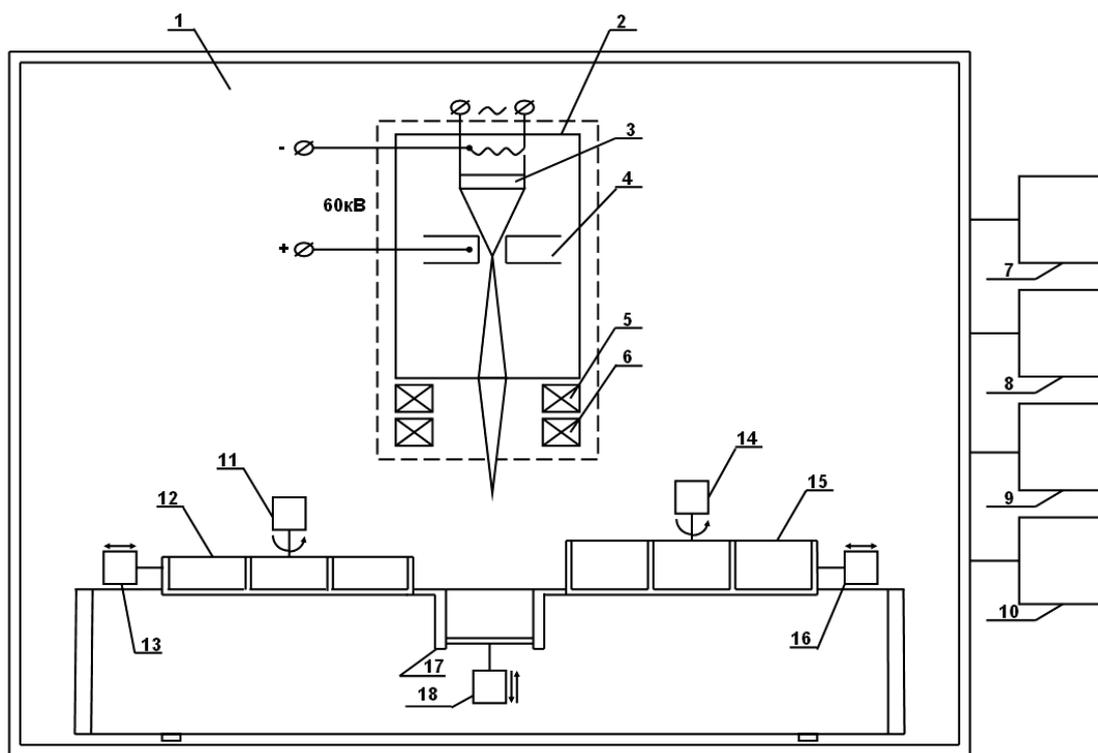


Рис. 16. Структурная схема установки «СИЭС-3»

Револьверный механизм 15 состоит из комплекта одинаковых бункеров-питателей, оснащённых заслонкой для подачи порошка и ножом для выравнивания порошка на подложке. Выбор необходимого бункера-питателя осуществляется механизмом поворота 14, количество бункеров-питателей определяется химическим составом синтезируемого изделия. Револьверный механизм 12 состоит из комплекта шаблонов - пластин одинакового размера и толщиной по размеру порошка. Каждый шаблон имеет индивидуальную систему внутренних отверстий, совпадающую с площадью распределения порошка данного химического состава в горизонтальной

плоскости синтезируемого изделия. Выбор необходимого шаблона осуществляется механизмом поворота 11, линейное перемещение – механизмом 13.

Подача порошка под нож осуществляется механизмом управления заслонкой, перекрывающей свободное перемещение порошка на подложку. Механизм перемещения бункеров-питателей 16 обеспечивает нанесение слоя порошка на подложку. При горизонтальном перемещении механизма открывается заслонка бункера для дозированной подачи порошка под нож, который при продольном движении осуществляет равномерное выравнивание порошка. При формировании горизонтального слоя из порошка различного химического состава происходит нанесение слоя порошка первого химического состава на индивидуальный шаблон. Шаблон отводится в сторону и на поверхности подложки остаётся порошок, распределённый по внутренней геометрии шаблона. Далее происходит плавление порошка данного состава, поворот револьверного механизма, выход на рабочую позицию бункера-накопителя с порошком следующего химического состава.

В разделе 5.2 приведена схема специализированной установки «СИЭЛ-4», предназначенной для реализации гибридной технологии получения композиционных изделий на базе методов электронно-лучевого синтеза и электронно-лучевого напыления. Сочетание этих методов позволяет получать изделия в вакуумной среде из различных комбинаций металлических и керамических слоев.

К особенностям данного конструкторского решения следует отнести наличие двух камер для реализации технологий электронно-лучевого синтеза изделий и напыления. К основным элементам установки относятся следующие узлы и механизмы (рис. 17): камера синтеза 1, технологический затвор 2, камера напыления 3, электронная пушка для синтеза 4, каретка для нанесения порошка на подложку 5, слой порошка 6, изделие 7, стол 8, слой с напылением 9, тигель 10, слиток для испарения 11, пушка для испарения 12.

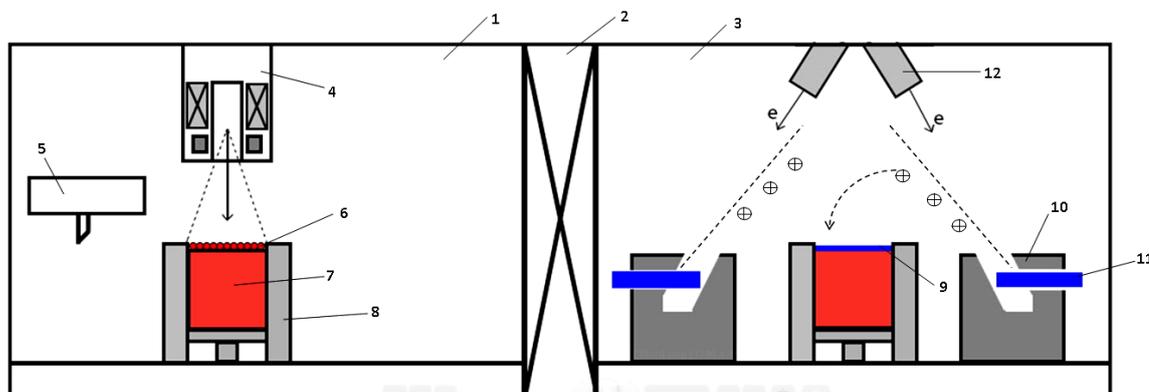


Рис. 17. Структурная схема установки «СИЭЛ-4»

Повышение эксплуатационных свойств изделия проводится путем корректировки комбинации, режимов синтеза изделий и напыления. Технология позволяет проводить послойную обработку в импульсном или непрерывном режиме не только поверхностного слоя, но и в процессе «роста» изделия. Управляющими параметрами для получения в каждом слое материала заданной структуры являются ток пучка, скорость сканирования, диаметр пучка в месте встречи с мишенью, время импульса пучка, время паузы.

Следует отметить преимущества данной схемы:

- коэффициент использования напыляемого материала 30-90 % (вместо 3-7 %);

- приведенная длина загрузки 5-10 м;
- толщина напыляемого слоя управляемая как вдоль оси изделия, так и в его азимутальном направлении от 0 до 100 %;
- адгезия напылённого слоя к подложке на несколько порядков выше.

Управление системой откачки и контроль состояния осуществляются в автоматическом режиме программируемым контроллером. Программное обеспечение контроллера обеспечивает последовательное управление исполнительными элементами вакуумной системы в соответствии с заданным режимом работы (подготовка вакуумной системы к работе, создание рабочего вакуума, проверка натекания, окончание работы) при соблюдении блокировок, гарантирующих безопасную работу и эксплуатацию установки.

В разделе 5.3 приведена схема специализированной установки типа «УИП-3», предназначенной для получения композиционных изделий на базе метода послойного синтеза ионным пучком (СИП). В настоящее время актуальной является задача быстрого получения изделий сложной геометрической формы из многокомпонентных систем: карбиды, бориды, нитриды титана, молибдена, тантала, ниобия, вольфрама.

Разработка технологии СИП, проектирование принципиально нового технологического оборудования:

- открывает новые возможности по формированию химического состава композиционного изделия, где в качестве элементов могут быть использованы ионы различных газов, которые при бомбардировке металлического порошка образуют новые химические соединения;
- позволяет значительно повысить точность изготовления изделий (размеры кроссовера ионного пучка при ускоряющем напряжении 120-150 кВ достигают 1 мкм, что на два порядка меньше электронного пучка);
- получать многокомпонентные сплавы, включая порошки химически активных тугоплавких металлов, так как процесс реализуется в вакууме.

Перечень ионов, которые можно получить из ионного источника, практически не ограничен. Ионы можно получить не только из однокомпонентных газов (кислород O_2 , водород H_2 , азот N_2 , аргон Ar , гелий He и пр.), но и из многокомпонентных газов, таких как углекислый газ CO_2 (ионы углерода C^+ и кислорода), фтористый бор BF_3 (ионы бор B^+ и ионы фтора F^-), тетрафторид кремния SiF_4 (ионы кремния Si^+ и ионы фтора F^-), фторид фосфора PF_5 (ионы фосфора P^+ и ионы фтора F^-) и др.

В работе предложено несколько новых схем формирования композиционного изделия с помощью ионного пучка:

1. Нанесение на поверхность изделия тонкой плёнки методом термического испарения с последующей обработкой ионным пучком образовавшейся поверхности, плавление пленки, заполнение пор между порошком более тугоплавкого металла.
2. Послойная бомбардировка ионами газа металлического порошка.

В качестве примера в разделе 5.3 рассмотрен синтез композиционного изделия из порошков вольфрама W и алюминия Al . Обработка порошка вольфрама ионами углерода до подачи алюминия позволяет получить карбид вольфрама, обладающий алмазоподобными свойствами. Таким образом, формируется изделие, включающее: вольфрам – карбид вольфрама – алюминий – карбид алюминия – оксид алюминия.

В результате обработки каждого слоя ионным пучком получается изделие, обладающее следующими свойствами:

- высокая механическая прочность, определяемая наличием порошка вольфрама;
- высокая жаропрочность (способность материала сохранять эксплуатационные свойства при высоких температурах);
- высокая жаростойкость, определяемая процентным содержанием алюминия в материале.

Использование концентрированного потока ионов при процессе СИП позволяет управлять структурой изделия и обеспечить локальное воздействие на элементарную ячейку, формируя за счет этого сплав с заданным сочетанием порошков различного химического состава. Изменение свойств композиционных порошковых изделий проводится путем корректировки комбинации и режимов синтеза изделий и термической обработки.

Предложенный подход позволяет не только создавать принципиально новые композиционные изделия с прогнозируемыми свойствами, которые невозможно получить традиционными способами, но и изготавливать их изделия сложной геометрической формы. Система фокусировки ионного источника обеспечивает диаметр кроссовера ионного пучка 1 мкм, что обеспечивает принципиально новые технологические возможности по получению изделий с высокой размерной точностью волокон композиционных изделий.

В разделе 5.4 приведена схема специализированной установки типа «УТ-1», предназначенной для ионной химико-термической обработки порошка. Для придания порошку необходимого комплекса теплофизических и механических свойств целесообразно проведение операции химико-термической обработки в плазме тлеющего разряда. В результате этой операции возможно получение порошков карбидов, боридов, нитридов титана, молибдена, вольфрама, гафния, тантала, ниобия. Процесс проводится в среде одного или смеси газов: азота, фтора, углекислого газа, ацетилена, фтористого бора и др. Ионная химико-термическая обработка обеспечивает механическую имплантацию ионов газа в порошок, формирование диффузионного слоя и распространение внедрившихся ионов по всему объёму порошка. При этом глубина насыщения порошка ионами газа зависит от времени обработки и величины ионного тока.

На рабочий стол установки подается электрический потенциал от источника постоянного напряжения. Ключ с регулируемой частотой может прерывать подачу напряжения для более равномерного облучения порошка ионами. Под воздействием электрического потенциала вокруг стола возникает тлеющий разряд и плазма. Ионы из этой плазмы притягиваются и ускоряются до энергии 300-1000 эВ потенциалом стола. Попадая на порошок, ионы механически внедряются в его поверхность, так как энергия удержания атомов в решетке частиц порошка составляет 3-7 эВ. Распространение ионов по всему объёму порошка осуществляется за счёт диффузии.

Количество ионов, приходящееся на одну частицу порошка, определяется временем обработки и величиной ионного тока, который регулируется как подаваемым потенциалом на рабочий стол, так и плотностью плазмы. Плотность плазмы, в свою очередь, зависит от скорости натекания рабочего газа из системы газовой подготовки.

Введение данной операции в технологию получения порошка методом PREP позволит формировать многокомпонентные изделия с повышенными теплофизическими и механическими свойствами. Кроме этого, дальнейшее

развитие получают аддитивные технологии, поскольку на базе порошков карбидов, боридов, нитридов различных металлов возможно получение принципиально новых композиционных изделий.

В разделе 5.5 приведена схема однокамерной установки «СИЭЛ-5», предназначенной для реализации гибридной технологии синтеза композиционных порошковых изделий:

- матрица изделия выращивается методом электронно-лучевого плавления, который обеспечивает высокую производительность;
- получение демпфирующих, упрочняющих слоёв толщиной от единиц нанометров осуществляется методом электронно-лучевого напыления;
- модификация поверхности порошка выполняется методом ионно-имплантационной обработки слоя с использованием источника высокоэнергетических ионов.

Данный подход позволяет получать изделия, армированные аморфными алмазоподобными слоями различного химического состава с целью существенного повышения служебных свойств.

К особенностям конструкторского решения установки «СИЭЛ-5» следует отнести наличие двух электронно-лучевых пушек и одного ионного источника. Первая электронно-лучевая пушка предназначена для послойного синтеза изделия методом плавления. При синтезе матрицы электронный луч перемещается по подложке или формируемому изделию со скоростью сканирования. Узел подачи порошка на подложку состоит из шести аналогичных механизмов, каждый из которых содержит порошок заданного различного химического состава. Если номенклатура порошков, необходимая для синтеза изделий меньше, то можно распределить порошок по механизмам пропорционально их объемному составу. Система электронно-лучевого напыления предназначена для формирования металлических и керамических слоев в процессе синтеза изделия. В состав системы напыления входят: вторая электронно-лучевая пушка, тигельный узел со щелями под определенным углом. Испаряемый электронной пушкой слиток подаётся вертикально.

Алгоритм процесса напыления следующий:

- подаётся ток смещения, в результате луч располагается в центре очередной концентрической щели;
- производится сканирование луча вдоль концентрического отрезка размерами в щель;
- луч переключается на следующую щель.

Пары испаряемого вещества поднимаются по щели к выходу из нее. Часть щелей остается пустыми. Они служат для получения необходимых ионов из газов. В основании щелей располагаются отверстия для дозируемого напуска газов, которые проходя через щель навстречу электронному лучу будут ионизироваться и притягиваться отрицательно заряженной подложкой синтезируемого изделия.

Модификация поверхности слоя по программно заданному сечению осуществляется с помощью ионного источника. При достаточно высоких скоростях сканирования ионным пучком расплавления слоя не происходит. Ионы большой энергии, чисто механически, глубоко внедряются в поверхность синтезируемого изделия. Модифицированный слой является абсолютно химически стойким. Следствием этого являются и остальные его уникальные физико-механические свойства. Разрушить такое состояние термическим воздействием невозможно,

поскольку теплового импульса атома не достаточно, чтобы преодолеть этот потенциальный барьер.

Таким образом, в главе 5 предложены оригинальные конструкторские решения механизмов подачи порошка, вибраций, ножа, которые могут быть использованы в различном оборудовании послойного синтеза изделий.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Для реализации поставленных в диссертационной работе задач выполнены теоретические и практические исследования на основе физики твердого тела, механики деформации и разрушения твердых тел; электронно-лучевой технологии плавки; вычислительной математики, положений теории принятия решений и оптимизации.

Основные выводы, полученные в диссертационной работе, сводятся к следующему:

1. В результате проведённых численных, аналитических и экспериментальных исследований осуществлено решение важной научно-технической проблемы по получению порошковых и композиционных изделий различного химического состава с программируемой структурой методами послойного электронно-лучевого плавления/спекания, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления, ионно-имплантационной модификации поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов. Предложенный подход позволяет не только создавать принципиально новые композиционные материалы с прогнозируемыми свойствами, которые невозможно получить традиционными способами, но и изготавливать из них изделия сложной геометрической формы; создавать новые классы порошковых и композиционных изделий и формировать структуры, не реализуемые в рамках равновесных и квазиравновесных технологических процессов; получать изделия, армированные аморфными алмазоподобными слоями различного химического состава с целью существенного повышения служебных свойств. Композиция порошка различного химического состава в каждом горизонтальном и вертикальном слое изделия может быть изначально запрограммирована.

2. Определены научно-технологические закономерности процессов получения порошковых и композиционных изделий на базе гибридных технологий, основанные на предварительном численном и аналитическом моделировании, что позволяет формировать программируемую структуру из порошка требуемого размера и различного химического состава, включая порошок химически активных металлов; осуществлять размерную обработку изделий электронным лучом с высокой точностью; обеспечивать получение изделий с заданными свойствами.

3. Изучены особенности получения металлических порошков, включая порошки тугоплавких металлов и сплавов, методом плазменного распыления вращающегося электрода на базе аэротермодинамической математической модели, объединяющей аэродинамические параметры с параметрами тепло- и массопереноса и ударного контакта частицы со стенкой камеры. Универсальность численной аэротермодинамической модели позволяет рассчитать режимы при получении порошка из различных металлов и сплавов, принимать обоснованные решения при назначении геометрических размеров при проектировании специализированного технологического оборудования. На основе расчётных данных модели (температура, время и скорость полёта частицы) можно вводить в конструкцию

установок дополнительные устройства охлаждения частиц с целью получения необходимой структуры и свойств порошка.

4. Предложена численная математическая модель процесса послойного электронно-лучевого синтеза изделий с учётом нелинейной зависимости теплофизических параметров от температуры, фазовых переходов расплавленного слоя и гидродинамических процессов движения жидкого металла со свободной верхней границей вследствие действия гравитационных, капиллярных и термокапиллярных сил. Модель позволяет исследовать движение жидкого металла; оценить погрешность размерной обработки, усадку слоя, вероятность возникновения пор в случае большей скорости кристаллизации металла по сравнению со временем растекания порошка; прогнозировать структуру изделия. На примере синтеза изделия из порошка титанового сплава ВТ6 выполнено определение параметров процесса на базе аппарата векторной оптимизации.

5. Разработаны научные основы инновационной технологии синтеза изделий из порошков различного химического состава, включающей следующие технологические операции:

- получение порошка шаровидной формы из различных металлов и сплавов, включая порошок тугоплавких химически активных металлов;
- послойный электронно-лучевой синтез изделий;
- высокотемпературная газостатическая обработка.

6. Проведено исследование порошкового титанового сплава ВТ6, полученного методом электронно-лучевого синтеза и изучены его свойства: состояние поверхности и механические характеристики. Результаты испытаний показали, что порошковый титановый сплав ВТ6, полученный методом послойного электронно-лучевого синтеза, по механическим свойствам не уступает сплаву ВТ6, изготовленному по традиционной металлургической технологии, а по ряду характеристик превосходит его. Сплав ВТ6, полученный по технологии послойного синтеза изделий из порошка, обеспечивает меньшую анизотропию и меньший разброс значений механических свойств по сечению, имеет более высокий уровень ударной вязкости по сравнению с литым материалом. Исследована износостойкость (линейная и объёмная интенсивность изнашивания, линейный износ за цикл, скорость изнашивания) изделий, полученных по технологиям газостатического прессования и электронно-лучевого синтеза. Скорость изнашивания материала, полученного по технологии электронно-лучевого синтеза, примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с полученным по технологии газостатического прессования.

7. Выдвинутые в диссертации научные положения и выполненные в соответствии с ними теоретические и экспериментальные исследования позволили решить важную научно-техническую задачу: получение композиционных изделий из порошков титанового сплава, молибдена, оксида молибдена методами послойного электронно-лучевого плавления, вакуумной пайки; электронно-лучевого напыления различных металлических (сплавы на основе никеля, кобальта, хрома, алюминия, иттрия) и керамических слоёв (оксиды циркония и иттрия).

8. Предложенное специализированное оборудование для реализации гибридных технологий, сочетающих различные методы послойного формирования изделия (электронно-лучевой/ионный синтез, вакуумная пайка, электронно-лучевое напыление, ионно-имплантационная модификация поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов) предоставляет новые возможности по созданию порошковых и композиционных изделий (сложные

многокомпонентные магнитные системы; средства для противоположной защиты бронетехники и индивидуальной защиты; детали и узлы ракетных комплексов, авиационных двигателей, наземных газотурбинных установок). Разработана классификация специализированного технологического оборудования для реализации операции послойного синтеза электронным лучом в зависимости от способа подачи и устройства хранения порошка, схемы формирования различных сочетаний порошков, способа формирования горизонтального слоя из порошков различного химического состава.

9. Разработаны конструкторские решения специализированного оборудования, обеспечивающие возможность реализации различных гибридных технологий:

- послойного электронно-лучевого синтеза;
- послойного электронно-лучевого плавления/спекания, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления;
- послойного электронно-лучевого плавления/спекания, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления, ионно-имплантационной модификации поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов;
- послойного ионного синтеза.

10. Для практического использования разработаны различные исполнения мультипроцессорных систем управления специализированного оборудования, включающие набор современных микропроцессорных, микроконтроллерных и компьютерных аппаратных средств; библиотеки математического и алгоритмического обеспечения; программные модули, которые реализуют различные априорные и адаптивные законы управления процессами получения порошка, послойного синтеза изделий и базируются на обработке информации в реальном масштабе времени с использованием датчиков обратной связи и устройств управления сканированием луча. Программные решения позволяют повысить уровень управляемости и повторяемости параметров технологического процесса, исключить влияние субъективных факторов на процесс синтеза. Результаты исследований эффективно используются при разработке систем управления различного технологического оборудования (сварочного, термического, плавильного, нанесения защитных покрытий, пайки).

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Будкин Ю.В., Соколов Ю.А. Программно-целевой способ обеспечения температурного поля электронно-лучевой сварки тугоплавких металлов со сталью // Сварочное производство. – 2010. – № 12. – С. 7-12.
2. Ваулин Д.Д., Генченков С.В., Дьяков В.В., Кульнев А.В., Соколов Ю.А., Старовойтенко Е.И. Специализированная технологическая установка для получения гранул жаропрочных и титановых сплавов методом центробежного распыления // Металлургия машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 30-34.
3. Генченков С.В., Дьяков В.В., Кузнецов С.Ю., Соколов Ю.А. Автоматизированный комплекс «ВАК»: новые технологические возможности индукционной плавки в холодном тигле // Литейное производство. – 2014. – № 4. – С. 37-40.
4. Казаринов Д.А., Комаров М.А., Малеев А.В., Соколов Ю.А. Универсальная установка типа «ВИП НК ПМ» для получения изделий с различной структурой //

Литейное производство. – 2014. – № 3. – С. 32-35.

5. Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Исследование движения расплавленной гранулы по поверхности формируемого изделия в процессе электронно-лучевого синтеза изделий // *Металлообработка*. – 2014. – № 1 (79). – С. 27-31.

6. Константинов В.В., Поляков А.Н., Соколов Ю.А., Чуклинов С.В. Установка «ЭЛУ 20Р»: новые возможности для электроннолучевой сварки // *Сварочное производство*. – 2009. – № 9. – С. 43-46.

7. Константинов В.В., Купченко Г.В., Симонов А.М., Соколов Ю.А. Естественные композиционные материалы для газотурбинных двигателей // *Литейное производство*. – 2004. – № 11. – С. 7-11.

8. Лукьянов А.А., Соколов Ю.А. Механические свойства композиционных материалов, полученных методом синтеза электронным лучом // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2014. – № 4 (207). – С. 174-180.

9. Маслеников И.А., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Исследование напряженного состояния зоны стружкообразования с помощью программного комплекса ANSYS Workbench // *Металлообработка*. – 2012. – № 5-6. – С. 18-23.

10. Маслеников И.А., Соколов Ю.А. Структурно-параметрическая оптимизация токарной операции с использованием многоцелевой функции // *Станки и инструмент*. – 1997. – № 1 – С. 23-26.

11. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // *Технология машиностроения*. – 2015. – № 1. – С. 11-16.

12. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Математическая модель управляемого нагрева подложек прямоугольной формы при получении порошковых материалов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2014. – № 2 (195). – С. 85-92.

13. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Определение температурного поля при сканировании поверхности электронным лучом в технологии синтеза порошковых изделий // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2014. – № 2 (195). – С. 109-116.

14. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2014. – № 8. – С. 40-45.

15. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Моделирование процесса электронно-лучевого синтеза изделий из порошка титанового сплава ВТ6 с учетом теплоты фазового перехода (двухфазная задача Стефана) // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2014. – № 3 (202). – С. 146-153.

16. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Определение теплофизических свойств материалов для моделирования процесса получения металлических гранул // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2014. – № 3 (202). – С. 170-179.

17. Соколов Ю.А., Журавлёв С.Н. Основные функции системы управления электронно-лучевой установки // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2010. – № 9. – С. 28-31.

18. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 35-41.

19. Соколов Ю.А., Константинов В.В., Поклад В.А. Совместный проект установок вакуумного литья // Литейное производство. – 2007. – № 8. – С. 19-22.
20. Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Особенности получения гранульных композиционных материалов // Металлообработка. – 2014. – № 5. – С. 35-41.
21. Соколов Ю.А., Кулешов В.Г. Организация современных технологических систем на базе информационной технологии // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – № 3. – С. 21-23.
22. Соколов Ю.А. Получение композиционных материалов с программируемой структурой из гранул различного химического состава методом послойного электронно-лучевого синтеза // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 47-51.
23. Соколов Ю.А. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий с помощью электронного луча // Металлообработка. – 2013. – № 4. – С. 11-16.
24. Соколов Ю.А. Особенности проектирования технологической операции электронно-лучевой обработки // Металлообработка. – 2014. – № 2. – С. 16-22.
25. Соколов Ю.А. Структурно-параметрическая оптимизация процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Металлообработка. – 2014. – № 4. – С. 23-29.
26. Соколов Ю.А. Система управления PCNC сварочного автомата // Сварочное производство. – 1994. – № 3. – С. 21-23.
27. Соколов Ю.А. Автоматизация технологического процесса получения отливок методом направленной кристаллизации // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 3. – С. 4-6.
28. Соколов Ю.А. Автоматизация процесса литья изделий с направленной и монокристаллической структурой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 4. – С. 27-28.
29. Соколов Ю.А. Вопросы модернизации технологического оборудования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 5. – С. 7-9.
30. Соколов Ю.А. Организация аппаратных и программных средств системы управления станочного оборудования на базе компьютерной технологии // Приборы и системы управления. – 1993. – № 9. – С. 33 – 37.
31. Соколов Ю.А. Автоматизация технологического процесса электронно-лучевой сварки на базе сети контроллеров семейства DirectLogic (на примере установки «ЭЛУ ПМ») // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2009. – № 12. – С. 38-40.
32. Соколов Ю.А. Оптимальное управление процессом вакуумного литья // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2001. – № 9. – С. 25-27.
33. Соколов Ю.А. Методы оптимального управления технологическими процессами // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2002. – № 4. – С. 22-24.
34. Соколов Ю.А. Решение задачи интерполяции по геометрическим и технологическим осям на базе контроллера DL-06 // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – № 1. – С. 41-43.
35. Соколов Ю.А. Особенности построения современных систем управления электронно-лучевых установок // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 8. – С. 5-8.
36. Соколов Ю.А. Автоматическая система управления печи индукционного нагрева // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – № 6. – С. 16-18.
37. Соколов Ю.А. Автоматизация процесса нанесения металлических и керамических порошковых материалов на поверхности изделий методом плазменного напыления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2009. – № 11. – С. 14-16.

Патенты:

38. Патент РФ 2297583 С2. Вакуумная индукционная печь с печью подогрева форм / Константинов В.В., Проканов О.М., Соколов Ю.А. Опубликовано: 20.04.2007, Бюл. № 11.
39. Патент РФ 2328363 С2. Вакуумная камера для электронно-лучевой обработки / Гейкин В.А., Ноговицын Е.М., Пузанов С.Г., Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Шаронова Н.И., Константинов В.В., Савчук В.П., Соколов Ю.А. Опубликовано: 10.07.2008, Бюл. № 19.
40. Патент РФ 2375147. Способ получения литых деталей с гранулярной структурой / Никишин В.А., Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Вдовец В.М., Рудницкий С.В., Семионов Е.Н., Петров Е.Е., Константинов В.В., Соколов Ю.А. Опубликовано: 10.12.2009, Бюл. № 56.

Учебные пособия и книги

41. Будкин Ю.В., Сивов Е.Н., Соколов Ю.А. Электронно-лучевая сварка. Учебное пособие. М: ДПК-пресс, 2010. – 106 с.
42. Соколов Ю.А., Кулешов В.Г. Построение систем управления на базе контроллеров Direct Logic. – М. Компания Спутник+, 2004. - 147 с.

Статьи и материалы конференций

43. Соколов Ю.А., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Микроструктура и износостойкость сплавов титана полученных методом послойного электронно-лучевого синтеза // Вестник ТвГУ. Сер. Физика. – 2013. – Т. 18. – С. 35-44.
44. Соколов Ю.А. Архитектура системы управления станочного оборудования на базе компьютерной технологии // Авиационная промышленность. – 1993. – № 3-4. – С. 33-35.
45. Соколов Ю.А. Применение элементов искусственного интеллекта при управлении технологическим оборудованием // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – 1992. – № 4. – С. 17-20.
46. Соколов Ю.А. Организация программного обеспечения технологических комплексов // Авиационная промышленность. – 1992. – № 7. – С. 43-45.
47. Соколов Ю.А. Организация программного обеспечения микропроцессорного контроллера // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – 1992. – № 4. – С. 17-18.
48. Соколов Ю.А. Интерактивная система управления технологического оборудования // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – 1991. – № 2. – С. 7-9.
49. Соколов Ю.А., Журавлёв С.Н. Новый подход к построению вакуумных систем // Авиационная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 50-53.
50. Соколов Ю.А. Электроннолучевое оборудование для реализации национальных программ по авиастроению, судостроению, сверхпроводникам и нанотехнологиям // Технология и оборудование электронно-лучевой сварки – 2008. Материалы 1-й Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции. – Спб.: ООО Агенство «ВиТ-Принт», 2008. – С. 157-163.
51. Соколов Ю.А. Установка нового поколения для электроннолучевой сварки // Технология и оборудование электронно-лучевой сварки – 2008. Материалы 1-й

- Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции. – СПб.: ООО Агенство «ВиТ-Принт», 2008. – С. 190-197.
52. Соколов Ю.А., Скворцов И.В. Энергетический сварочный комплекс «БЭВС-60/15» на базе прямонакальной пушки и высоковольтного стабилизированного источника питания // Технология и оборудование электронно-лучевой сварки – 2011. Материалы 2-й Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции. – СПб.: ООО Агенство «ВиТ-Принт», 2011. – С. 218-223.
53. Соколов Ю.А., Скворцов И.В. Установка «ЭЛУ-27»: новые возможности электронно-лучевых технологий // Технология и оборудование электронно-лучевой сварки – 2011. Материалы 2-й Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции.– СПб.: ООО Агенство «ВиТ-Принт», 2011.– С. 194-202.
54. Соколов Ю.А. Организация региональных систем и научно-технических центров Тверской области для выполнения национальных государственных программ // Материалы 1-го инновационного форума «Университет – региону», Тверь; Тверской государственный университет, 2009. – С. 133-144.
55. Соколов Ю.А. Исследование послойного электронно-лучевого синтеза изделий на базе математической модели // Технология и оборудование ЭЛС–2014. Доклады Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции 24-26 июня 2014 года. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 84-97.
56. Соколов Ю.А. Электронный луч: новые возможности по созданию многокомпонентных материалов // Технология и оборудование ЭЛС–2014. Доклады Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции 24-26 июня 2014 года. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 74-83.
57. Соколов Ю.А, Журавлёв С.Н. Особенности проектирования систем управления для процесса электронно-лучевой обработки // Технология и оборудование ЭЛС–2014. Доклады Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции 24-26 июня 2014 года.– СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014.– С. 46-54.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

58. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616556 Реализация траекторной задачи системы управления установки для послойного синтеза изделий электронным лучом: позиционирование механизмов стола / Константинов В.В., Кузнецов С.Ю., Арсин Д.В., Соколов Ю.А.