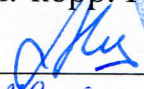



Федеральное агентство научных организаций  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ  
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТПМ СО РАН)

УДК 533:537:621  
№ государственной регистрации 01201351877  
Инв. № 6/17

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИТПМ СО РАН  
чл.-корр. РАН  
  
А.Н. Шиплюк  
«29» декабря 2016 г.



ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И  
ДИАГНОСТИКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРНЫХ И  
ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ,  
ТЕХНОГЕННОГО И ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ  
(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0323-2014-0003

Приоритетное направление III.18. Физико-технические и экологические  
проблемы энергетики, тепломассообмен, теплофизические и  
электрофизические свойства веществ, низкотемпературная плазма и  
технологии на ее основе

Программа ФНИ СО РАН III.18.1. Воздействие высококонцентрированных  
потоков энергии на материалы для улучшения их физико-механических  
характеристик

Протокол Ученого совета ИТПМ СО РАН  
№ 12 от 01.12.2016












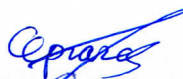




Руководитель проекта  
д.ф.-м.н.



О.Б. Ковалев

Новосибирск 2016

### Список исполнителей

1.	Ковалев О.Б.	зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н.		16.01.2017
2.	Аульченко С.М.	в.н.с., д.ф.-м.н.		16.01.2017
3.	Картаев Е.В.	с.н.с., к.ф.-м.н.		16.01.2017
4.	Зайцев А.В.	с.н.с., к.ф.-м.н.		16.01.2017
5.	Кузьмин В.И.	с.н.с., к.т.н.		17.01.2017
6.	Ермолаев Г.В.	с.н.с., к.ф.-м.н.		16.01.2017
7.	Емелькин В.А.	с.н.с., к.х.н.		16.01.2017
8.	Ващенко С.П.	н.с.		17.01.2017
9.	Беденко Д.В.	м.н.с.		16.01.2017
10.	Беляев В.В.	м.н.с.		16.01.2017
11.	Гурин А.М.	м.н.с.		16.01.2017
12.	Сергачев Д.В.	м.н.с.		17.01.2017
13.	Заварзин А.Г.	ведущий инженер		17.01.2017
14.	Лапин А.Н.	ведущий инженер		17.01.2017
15.	Шмыков С.Н.	ведущий инженер		16.01.2017
16.	Батомункуев Д.Ю.	ведущий инженер		16.01.2017

**РЕФЕРАТ** (отчет: 65 стр., 30 рис.; дата начала и окончания НИР: 2013-2016 гг.)

**Ключевые слова и словосочетания:** лазерное излучение, электро-дуговой разряд, металлы, керамика, плазмохимический реактор, нанопорошки, плазменное напыление, физический эксперимент, моделирование.

**Объектом исследования** являются лазерное излучение и электро-дуговой разряд как источники высококонцентрированных потоков энергии, которые используются при воздействии на различные материалы и вещества с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик, а также при переработке природного сырья и утилизации отходов (техногенных, бытовых и др.)

**Целью работы** является получение новых знаний о физико-химических процессах в лазерных и плазменно-дуговых технологиях. Исследования сконцентрированы по трем направлениям: (а) создание и совершенствование математических моделей и программ для оптимизации процессов лазерной обработки (резки листовых металлов, наплавки и спекания порошков); (б) теоретические и экспериментальные исследования плазменного напыления порошков и получение покрытий, в состав которых входят все виды металлов и тугоплавких соединений (бориды, карбиды, оксиды, нитриды); (в) создание плазмотронов для проведения исследований их эффективного использования в металлургических и химических отраслях промышленности при переработке различного вида сырья и отходов.

**Краткое изложение важнейших результатов работы и их новизны.**

1. Разработаны модели и программные средства численного моделирования лазерного взаимодействия с металлами и зернистыми средами для исследования технологических режимов лазерной резки, наплавки и прямого лазерного нанесения порошков.
2. Создан промышленный вариант плазменного оборудования для напыления и наплавки дисперсных материалов (металлических, керамических, композиционных) и получены покрытия и цельные изделия с уникальными свойствами: низкая пористость менее 1% и повышенная (по отношению к наносимому материалу) твердость покрытия.
3. Разработаны серии технологических плазмотронов, работающих с выносной дугой и в струйном режиме с ресурсом работы более 1000 часов в нейтральных, окислительных и химически активных газах.

**Важнейшим результатом по проекту** в целом является создание лабораторной плазмохимической установки и проведение цикла расчетно-экспериментальных исследований управляемого высокотемпературного синтеза наноразмерных частиц диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) анатазной модификации.

<b>Содержание</b>	
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>Блок 1: Теоретическое и экспериментальное исследование процессов лазерной обработки материалов.</b> .....	<b>7</b>
1.1. Исследование отрывных течений газа при лазерной резке металлов с нейтральным газом для различных геометрий сопловой лазерной головки .....	7
1.2. Лазерная резка с кислородом.....	9
1.3. Численное моделирование и визуализация газодинамических и двухфазных течений при лазерной порошковой наплавке и легировании .....	11
<b>Блок 2: Генераторы термической плазмы в технологиях нанесения покрытий и прототипирования изделий методами плазменного напыления и наплавки порошковых материалов</b> .....	<b>16</b>
2.1. Теплофизические исследования процесса воздушно-плазменного напыления жаростойких интерметаллидных покрытий из порошка сплава на основе никеля. Исследования структуры и трибологических свойств полученных покрытий .....	16
<b>Блок 3: Исследования физико-химических процессов в электродуговых технологиях переработки природного и техногенного сырья.</b> .....	<b>26</b>
3.1. Проектирование и создание лабораторного плазмотрона с МЭВ мощностью до 5 МВт и с рабочим давлением воздуха в дуговом канале до 50 атм. Исследование напряженности электрического поля на начальном и турбулентном участке столба электрической дуги высокого давления. ....	26
3.2. Численное моделирование перемешивания и осаждения примесей металлов в плазмотермическом реакторе при воздействии на расплав плазменной токовой струи ..	36
3.3. Расчетно-экспериментальное исследование синтеза диоксида титана анатазной кристаллической модификации при предварительном смешении реагентов и в условиях встречной закалки .....	41
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>48</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	<b>55</b>
Перечень статей, опубликованных по теме проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием.....	55
Наукометрические показатели в целом по проекту за период 2013-2016 гг. ....	57
Копии планов НИР по теме проекта, 2013-2016 гг. ....	58

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящий отчет является заключительным по теме: *«Моделирование, экспериментальные исследования и диагностика физико-химических процессов в лазерных и плазменно-дуговых технологиях обработки материалов, техногенного и природного сырья»*, по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

Лазерное излучение и электродуговой разряд являются источниками высококонцентрированных потоков энергии, которые активно применяются в машиностроении, металлургической и химической промышленности при обработке и модификации материалов, а также при переработке различного рода сырья. Все перечисленные отрасли относятся к быстроразвивающимся, их ускоренное развитие требует новых, более эффективных лазеров, плазмотронов и технологий на их основе.

**Цели проекта.** Проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов, связанных с направленным воздействием концентрированных потоков энергии (лазерного излучения и дугового разряда) на вещество для изменения их физико-химических свойств, и на этой основе создание и совершенствование лазерных и плазменно-дуговых технологий обработки материалов, утилизации и переработке техногенного и природного сырья. Работа состоит из трех блоков.

**Блок 1: Теоретическое и экспериментальное исследование процессов лазерной обработки материалов.** Целью исследования является развитие отечественных промышленных лазерных технологий металлообработки, в основном хорошо известной, но все еще бурно развивающейся, лазерной резки толстых листовых металлов, а так же относительно новой технологии прямого лазерного нанесения порошковых материалов. Лазерные технологии основываются на комплексе взаимосвязанных физических процессов, включающем плавление, испарение, многофазные течения, распространение излучения, тепловые процессы, поверхностные явления на границе раздела фаз и т.п. Развитие лазерных технологий требует проведение фундаментальных исследований с применением в совокупности всех методов: аналитических, численных, лабораторной диагностики, натурных экспериментов, структурного анализа [1,2]. В ходе каждого этапа решался определенный набор экспериментальных и теоретических задач, имеющий практическую значимость. При выполнении этапа 2016 проведено исследование двухфазных (газ+частицы) потоков, создаваемых сопловыми насадками, используемыми для лазерной наплавки и легирования. Показано, что важную роль, в формировании формы порошковой струи, ее фокусировки на обрабатываемой поверхности, играет закон взаимодействия частиц со стенками сопла. Создана установка и проведены эксперименты

по визуализации потока порошка для сопел при лазерной наплавке. Полученные данные были использованы для верификации результатов численного моделирования. Проведено моделирование физических процессов лазерной резки сталей с кислородом и нейтральным газом (для различных геометрий сопловой лазерной головки). Проведены металлографические исследования образцов лазерной резки с кислородом, и показано, что происходит насыщение слоя переплава углеродом и заметное науглероживание стенок реза.

***Блок 2: Генераторы термической плазмы в технологиях нанесения покрытий и прототипирования изделий методами плазменного напыления и наплавки порошковых материалов.*** Целью исследований является развитие и внедрение в промышленность технологии плазменно-порошкового нанесения функциональных покрытий. Работа проводилась по двум направлениям: (а) - разработка напылительных плазмотронов и их отдельных узлов, и (б) - отработка технологий нанесения функциональных покрытий из различных металлов, оксидных и карбидных керамик, композитов, а также создание корковых плазموкерамических изделий. Исследовались свойства и характеристики полученных покрытий. При выполнении этапа 2016 года была отработана технология нанесения интерметаллидных износостойких покрытий на основе никеля с алюминием, проведено исследование их микроструктуры и функциональных свойств.

***Блок 3: Исследования физико-химических процессов в электродуговых технологиях переработки природного и техногенного сырья.*** Третий блок проекта преследовал несколько целей. Длительность непрерывной работы плазмотрона является важнейшим технологическим параметром и ограничивается износом электродов за счет эрозии [3]. Создание восстанавливаемого в процессе эксплуатации (без остановки плазмотрона) графитового катода и, в меньшей степени, анода позволит убрать это ограничение. Естественную эрозию графитовых электродов предполагалось компенсировать осаждением продуктов разложения пропан-бутановой смеси подаваемой в приэлектродную область. Для нормальной работы плазмотрона требовалось найти условия осаждения плотных электро-теплопроводных покрытий с высокой степенью графитизации. В 2016 году направление работы было частично изменено (в соответствии с запросами аэрокосмической отрасли) на разработку и создание мульти-мега-ватного плазмотрона высокого давления с высоким КПД для испытания материалов, покрытий, деталей и узлов аэрокосмического назначения.

Ниже изложены результаты работ заключительного этапа 2016 года. В заключении сформулированы результаты выполнения поставленных целей и задач в целом по проекту.

## **Блок 1: Теоретическое и экспериментальное исследование процессов лазерной обработки материалов.**

### **1.1. Исследование отрывных течений газа при лазерной резке металлов с нейтральным газом для различных геометрий сопловой лазерной головки**

Одним из основных процессов, определяющих качество и экономические характеристики лазерной резки металлов с инертным газом, является вынос расплава металла газовой струей. Хорошо известно явление отрыва газового потока от фронта реза [1], что приводит к появлению характерной структуры шероховатости на поверхности реза и образованию грата, застывших капель металла, на нижней кромке. Существующие численные и экспериментальные исследования носили единичный характер и не давали полного представления о механизме процесса, натурная резка с различными соплами дает лишь качественную информацию о процессе.

В ходе выполнения проекта в 2016 году было проведено масштабное численное исследование положение точки отрыва в зависимости от комплекса параметров: диаметра сопла, давления газа, профиля диффузорного и конфузорно-диффузорного сопел. Для характерных и критичных с точки зрения качества для волоконных лазеров и толщины металла и ширины реза. Сформулирован критерий нахождения точки отрыва на фронте реза.

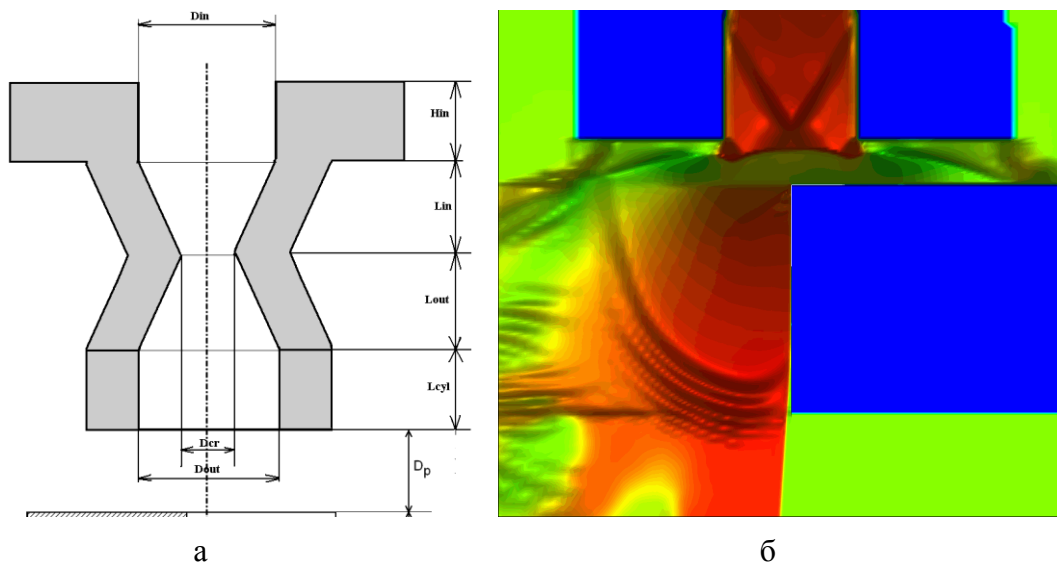
Для решения задачи рассчитывались полные уравнения Навье-Стокса для вязкого теплопроводного газа. Геометрия была максимально приближена к реальному процессу и включала в себя полностью сопло, пластину с узким каналом, имитирующим лазерный рез и значительную область вокруг, чтобы уменьшить влияние граничных условий на открытых участках.

Использовались конечноразностные Weno-схемы третьего порядка точности для разрешения по пространству и TVD-схемы второго порядка для интегрирования по времени. Для разрешения пограничного слоя требовался размер ячейки не более 1 мкм, для постановки корректных граничных условий, требовался размер расчетной области до 0.2 м. Таким образом, в расчетах использовалась неравномерная сетка, содержащая до 9 миллионов узлов. Современные методы вычислений, уникальная оптимизация и распараллеливание расчетов позволили получать результаты моделирования в приемлемые сроки.

Была проведена серия расчетов для исследования возможности создания безотрывного течения газа при лазерной резке 4 – 6 миллиметровых стальных пластин. Было рассчитано около 30 различных форм сопла с коническими диффузорными и

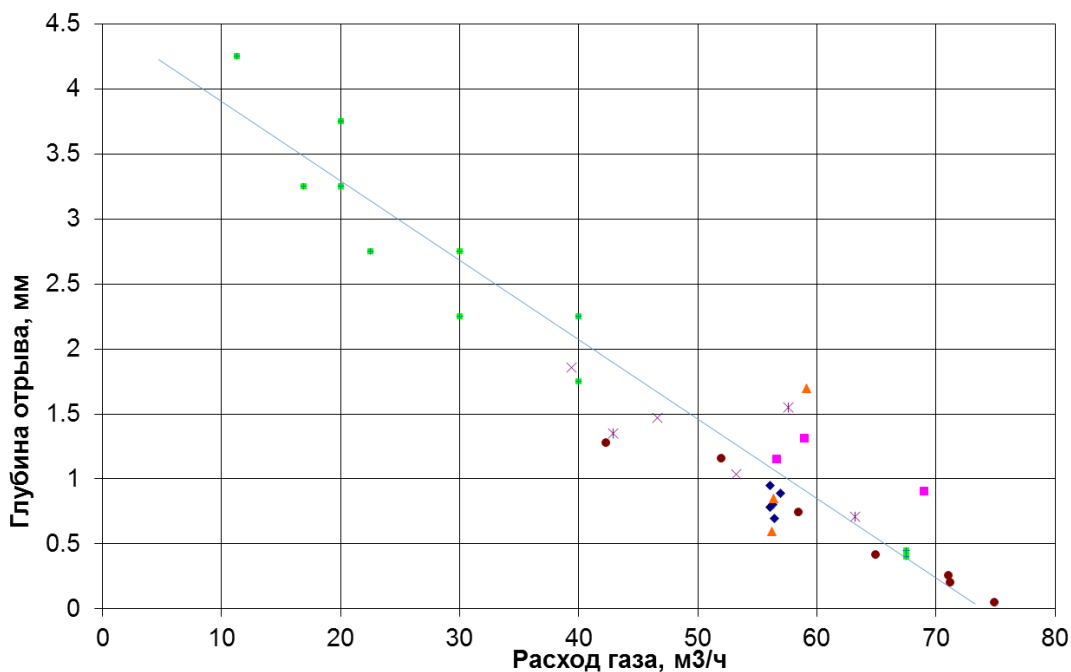
конфузорно-диффузорными профилями. Использовались давления от 10 до 18 атм. Всего было проведено более 100 расчетов.

На рис.1 представлена схема сопла и распределение скорости потока газа с наложенными градиентом плотности или «численным шпиреном». В зоне присоединения ударной волны образуется отрыв газового потока, ответственный за резкое ухудшение качества реза.



**Рис. 1** Схема сопла (а) и рассчитанная картина течения газа в лазерном резе(б)

Расчеты были сведены на общую зависимость глубины отрыва (насколько отрыв потока проникает внутрь канала) от расхода газа (рис.2).



**Рис. 2.** Зависимость глубины отрыва потока газа от расхода газа



На большом масштабе в координатах «Расход газа – Глубина отрыва» была получена почти линейная зависимость, рис. 2. В наиболее интересной области при расходах газа 50–80 м<sup>3</sup>/ч были получены оптимальные конфигурации сопла, которые позволяют получить безотрывное течение с существенной экономией расхода газа (до 25%). Как и предполагалось в наших более ранних работах, наилучшие результаты получаются при использовании конических сопел, точки для них лежат выше прямой линии тренда.

## **1.2. Лазерная резка с кислородом**

Использование лазерной резки, наряду с другими термическими методами резки, серьезно ограничено в производстве ответственных деталей. Особенно сильно это заметно в тяжелом машиностроении, мостостроении, аэрокосмической отрасли. Ответственные детали вырезаются с припуском в несколько миллиметров, который потом снимается механической обработкой, что крайне дорого и не всегда необходимо. Соответствующие физико-химические изменения материала изучены не достаточно, рекомендации и методики оценки влияния лазерного реза на материал крайне необходимы, но отсутствуют.

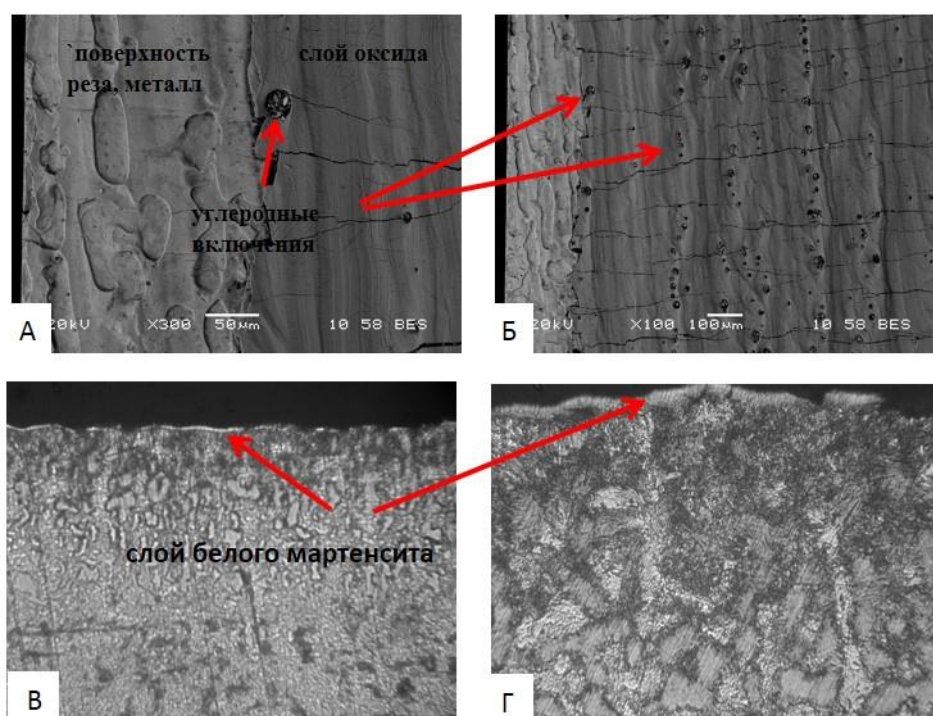
Хорошо известно, что при использовании кислорода в качестве вспомогательного газа на кромке термического реза в материале происходят физико-химические изменения. Даже малоуглеродистая низколегированная сталь в обычных условиях не подвергается закалке, по кромке лазерного реза с кислородом, или после газопламенной резки приобретает высокую твердость, приводящую к повышенному износу штамповой оснастки и режущего инструмента, коррекции радиусов гибки, снижению усталостных характеристик изделия и ряду других эффектов, влияющих на эксплуатационные характеристики материала и изделия. С точки зрения технологии резки требовалось уточнение достаточной чистоты кислорода для компенсации загрязнения режущей струи газообразными продуктами сгорания углерода.

Эффект повышения твердости заключается в науглероживании расплавленного материала и стенки реза. Что полностью противоречит обезуглероживанию материала наблюдаемых при термообработке и типовых металлургических процессах получения стали из чугуна в кислородных конверторах.

Проводилась резка сталей с различным содержанием кислорода ст 08, ст 20, ст 35 и ст 50 толщиной 6 и 10 мм излучением CO<sub>2</sub> лазера. Насыщение расплава металла и

боковых стенок углеродом исследовались металлографическими методами, а так же методом электронной сканирующей микроскопии.

Металлографические исследования отобранных образцов показали ряд интересных металлургических эффектов: растворение твердого металла жидким оксидом, насыщение слоя переплава углеродом и заметное науглероживание стенок реза. Насыщенный углеродом до 2% и более слой бесструктурного мартенсита имеет толщину 10-50 мкм в зависимости от толщины материала и условий резки и идентифицируется как рекристаллизовавшийся слой расплавленного материала. В следующей за ним ЗТВ основного материала распределение углерода носит ниспадающий, характерный для диффузионного насыщения характер.



**Рис. 3. Металлургические процессы в зоне реза.**

**А, Б – Поверхность лазерного реза, электронная микроскопия. Частицы углерода вморожены в оксидный слой.**

**В, Г – Металлография ЗТВ лазерного реза, на поверхности слой «белого» бесструктурного мартенсита толщиной около 10мкм .**

Приблизительные балансовые оценки перераспределения углерода показали, что почти весь углерод из массы, сгорающей в процессе резки стали остается в оставшемся в расплаве металле и стенках реза. Точность проведенных балансовых расчетов не позволяет утверждать о заметном окислении углерода до газообразных оксидов  $CO$  и  $CO_2$ , загрязняющих струю кислорода и снижающих скорость горения и резки. Глубина и характер науглероживания ЗТВ удовлетворительно описываются константами

низкотемпературной цементации, до 1000 °С, экстраполированных на более высокий диапазон температур при характерных для лазерной резки временах нагрева. Полученная методика может быть использована для оценки толщины и характеристик физико-химических изменений в ЗТВ.

### **1.3. Численное моделирование и визуализация газодинамических и двухфазных течений при лазерной порошковой наплавке и легировании**

Газодинамическая транспортировка порошка в зону воздействия лазерного излучения применяется в ряде перспективных технологий лазерной обработки материалов [2]. Лазерная порошковая наплавка позволяет наплавлять различные металлические, керамические и градиентные материалы. Путем послойного наращивания валиков материала удастся не только восстанавливать детали, но и осуществлять изготовление трехмерных изделий сложной пространственной формы. Технология широко востребована в прототипировании в аэрокосмической отрасли, машиностроении [2]. Для придания поверхности детали функциональных свойств – упрочнении, повышении коррозионной стойкости, жаростойкости, трибологических свойств и т.д., может использоваться лазерное легирование. Лазерное излучение позволяет переплавлять и перемешивать с необходимой присадкой только тонкий поверхностный слой, сохраняя структуру и свойства основного материала. Существует несколько схем газодинамической доставки частиц порошка в зону лазерного воздействия, в каждой из которых используются специально разработанные сопловые насадки.

Исследование фокусирующих свойств сопел имеет первостепенное значение для их проектирования и эффективного использования в лазерной наплавке и легировании. Локализация порошковой струи, степень нагрева и проплавления частиц в световом поле лазера отвечают за качество и свойства получаемых изделий. Например, нагрев и плавление порошка ещё до попадания в ванну расплава, является нежелательным для композиций, склонных к термическому разложению и окислению. В этом случае необходимо контролировать взаимодействие порошка с лазерным излучением.

На структуру порошковой струи, и её динамику влияние оказывают геометрия сопла, гранулометрический состав и физические свойства материала порошка. В целом физико-математическое описание лазерной наплавки и легирования порошкообразных материалов включает три главных задачи моделирования: газовую динамику струйных течений несущего и защитных газов; транспортировку и нагрев частиц в газовом потоке с участием лазерного излучения; динамическое, тепловое взаимодействие потока частиц с

подложкой и наращивание валика или слоя покрытия. В данной работе исследование ограничивается рассмотрением первых двух задач.

Для определения релевантности построенных моделей и выбранных констант моделирования численному расчету требуется верификация с экспериментальными данными. Визуализация потока методом лазерного «ножа», когда лазерный луч собирается оптическими методами в световую плоскость и рассеивается на частицах порошка – один из самых распространенных и информативных способов изучения двухфазного потока.

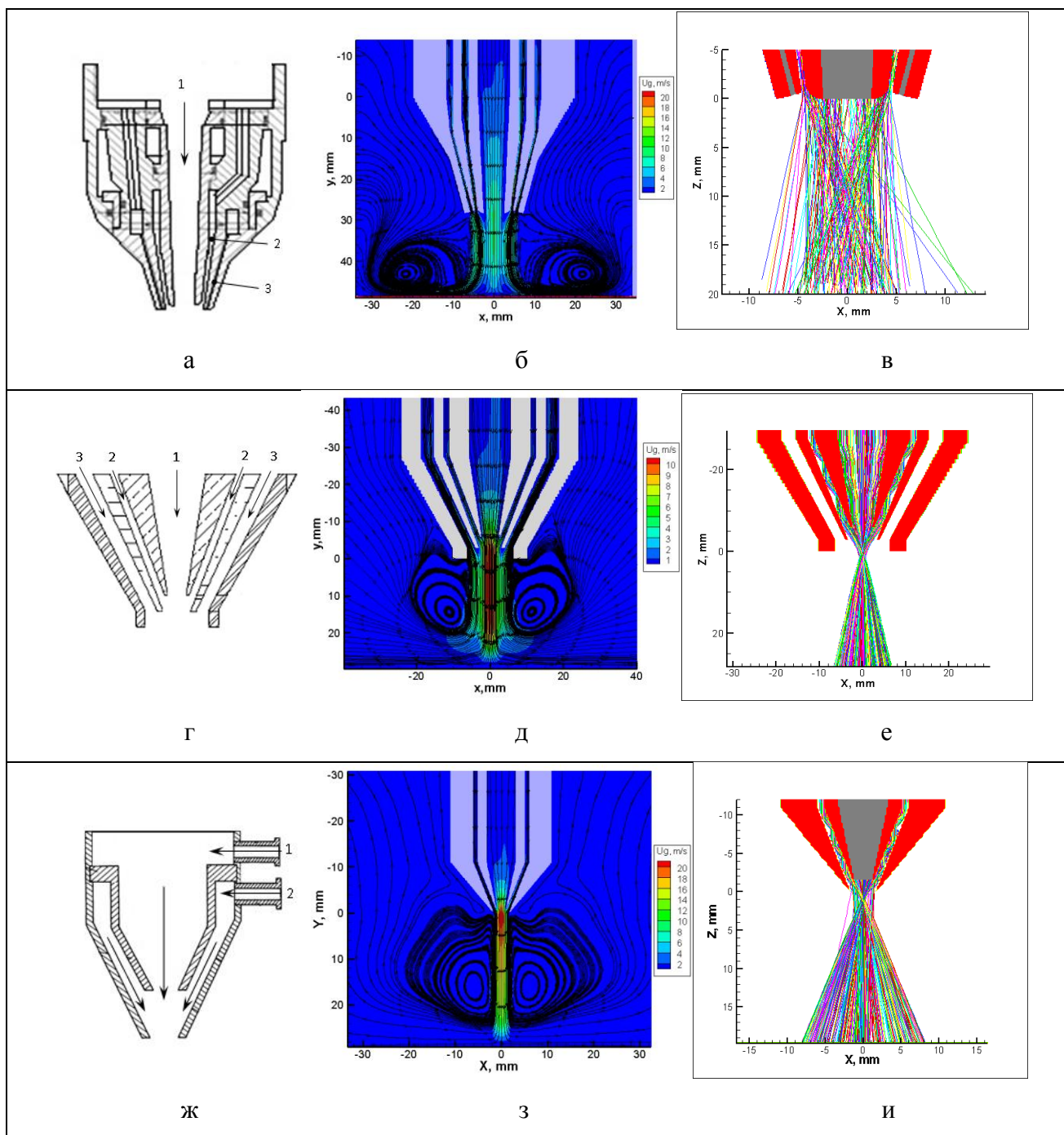
Для описания газодинамических внутренних течений в кольцевых каналах коаксиального сопла, а также внешних струйных течений с натеканием на подложку, рассматривается модель движения вязкого сжимаемого теплопроводного газа, записанная в форме полных уравнений Навье-Стокса с учетом тепло- и массопереноса в осесимметричной постановке:

Для моделирования транспортировки и лазерного нагрева порошка рассматривается движение индивидуальных частиц в потоке газа. Сила аэродинамического сопротивления, возникающая за счет вязкости газа, является одной из главных обычно рассматриваемых сил. При необходимости включается в рассмотрение сила тяжести. Используется траекторный подход, согласно которому уравнения, описывающие движение дисперсной среды, записываются в лагранжевых переменных и интегрируются вдоль траекторий индивидуальных частиц, при этом поле течения газа (распределение скорости и температуры) считается известным.

В ходе исследований было показано, что важнейшим фактором формирования формы струи порошка является закон взаимодействия частиц порошка с внутренними стенками сопла. В данной работе анализировалось два типа столкновений: абсолютно упругое отражение, т.е. без потерь кинетической энергии при столкновении и неупругое, когда скорость частицы при соударении уменьшается. Закон взаимодействия частицы со стенкой характеризуется коэффициентами восстановления для нормальной и тангенциальной составляющих скорости. В реальной ситуации эти коэффициенты зависят от механических свойств материалов частиц и стенки, формы поверхности контакта, степени шероховатости стенки, и могут быть взяты в общем случае только из сравнения с экспериментальными данными.

При внешнем подводе тепла к частице, находящейся в потоке газа, в нашем случае при лазерном воздействии, происходит её разогрев, плавление, а также возможно испарение. Теплообмен частицы с окружающей атмосферой и поглощение лазерного

излучение рассчитывались для каждой частицы индивидуально с учетом ее размера и траектории полета.

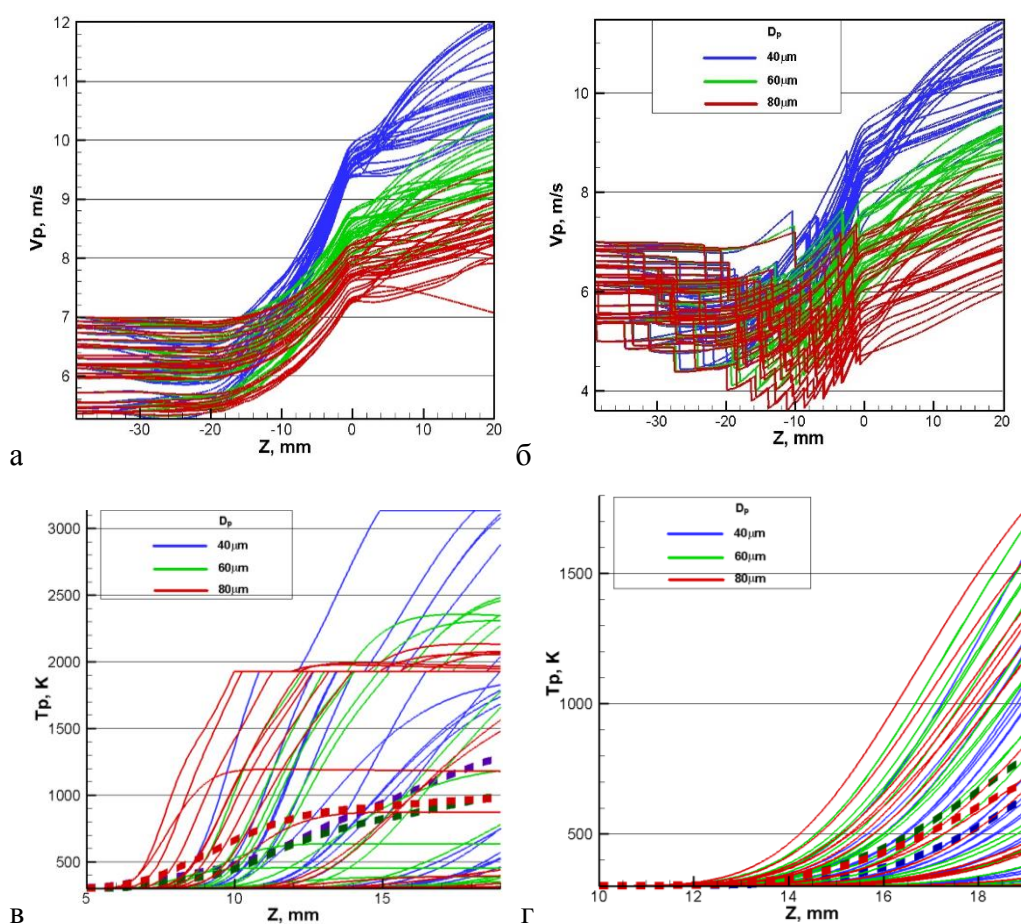


**Рис. 4.** Схемы сопел (а), (г) ,(ж) и соответствующие им распределения скорости газа с линиями тока при типичных расходах газа (б), (д) ,(з) и траектории частиц Ti–6Al–4V со средним массовым размером 70 мкм (в), (е) ,(и).

Исследование особенностей истечения многослойных газовых струй, формирование потока порошка и пространственное распределение твердой фазы

проведено на примере известных сопловых насадок для лазерной наплавки. На рис. 4 приведены типовые конструкции коаксиальных сопел Trumpf и Precitec (а), распределение скорости газового потока и линии тока газа, а также траектории частиц на примере частиц титанового сплава Ti-6Al-4V (BT23).

На примере сопла Trumpf на установке DMD505 было показано влияние закона отражения частиц от стенок сопла на характеристики потока частиц: пространственное распределение, скорость и нагрев. На рис. 5 представлены изменения скорости потока частиц и динамика их нагрева вдоль оси сопла при коэффициентах восстановления скорости 1 и 0.7. И хотя влияние закона отражения не так заметно на изменении модуля скорости частиц, нагрев частиц в случае упругого отражения гораздо сильнее.

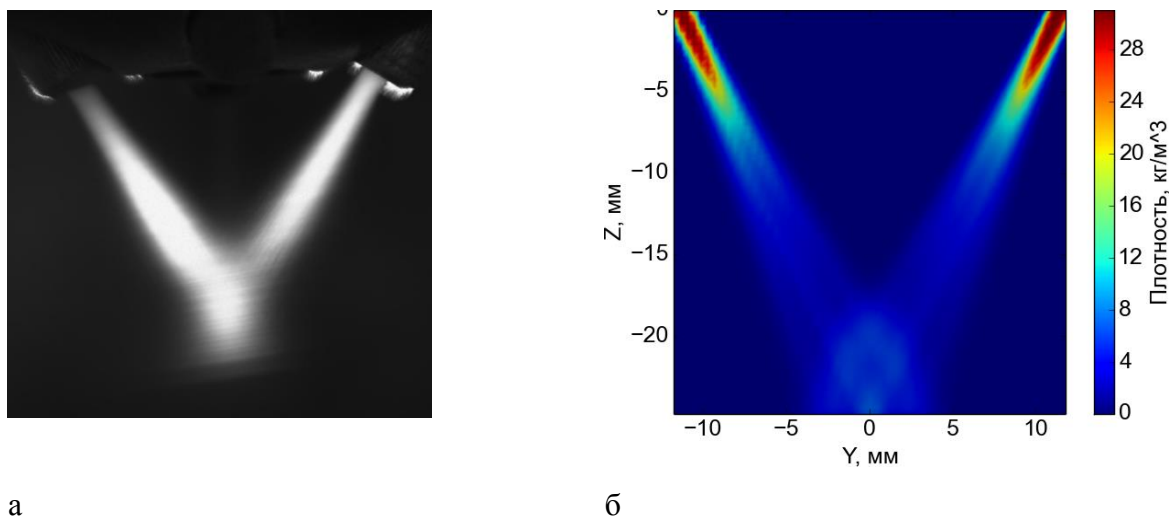


**Рис. 5.** Изменение скорости (а),(б) и температуры (в),(г) частиц вдоль оси сопла при упругом столкновении (а),(в) и неупругом (б), (г) с коэффициентом восстановления скорости 0.7. Пунктиром обозначена средняя температура частиц.

Это объясняется тем, что взаимодействие частиц со стенкой сопла в первую очередь влияет на траекторию частиц вне сопла, и в случае неупругого отражения меньше частиц попадает в зону высокой интенсивности излучения.



На рис. 6 представлены результаты визуализации потока методом «лазерного ножа», а так же рассчитанная средняя плотность двухфазного потока.



**Рис. 6. Визуализация двухфазного потока (а) и средняя плотность потока частиц, полученная в результате численного моделирования(б)**

Численно проведено исследование структуры формируемых двухфазных потоков на примере известных сопел, используемых для лазерной наплавки. Было показано, что важную роль в формировании формы порошковой струи, ее фокусировки на обрабатываемой поверхности играет закон взаимодействия частиц со стенками сопла. Этот же фактор оказывает значительное влияние на нагрев дисперсной фазы.

Создана установка и проведены эксперименты по визуализации потока порошка для сопел, используемых для лазерной наплавки. Полученные данные были использованы для верификации результатов численного моделирования. Было показано, что при коэффициентах восстановления скорости около 0.7 для частиц суперсплава Ti-6Al-4V формы струй порошка в эксперименте и в расчете оказываются близкими, при этом при отражении от стенок сопла частица теряет около половины своей кинетической энергии.

**Выводы:** Разработаны методики моделирования процессов лазерной обработки материалов, а.и. резки сталей с кислородом и нейтральным газом (для различных геометрий сопловой лазерной головки), а также двухфазных течений, создаваемых сопловыми насадками при лазерном легировании и наплавке. Разработанные модели и установки будут использованы для оптимизации режимов лазерной обработки (резки, наплавки, легирования), а также проектирования новых сопловых головок и насадок.

## **Блок 2: Генераторы термической плазмы в технологиях нанесения покрытий и прототипирования изделий методами плазменного напыления и наплавки порошковых материалов**

### **2.1. Теплофизические исследования процесса воздушно-плазменного напыления жаростойких интерметаллидных покрытий из порошка сплава на основе никеля. Исследования структуры и трибологических свойств полученных покрытий**

Алюминиды никеля вызывают широкий интерес благодаря сочетанию уникальных физико-механических свойств: высоким значениям температуры плавления, жаропрочности и жаростойкости, коррозионной стойкости и сопротивлению кавитационной эрозии. Кроме того, исследования показали, что алюминиды никеля, обладая высокой твердостью, имеют существенный потенциал для изделий, работающих на износ. Это делает их подходящими материалами для изготовления ответственных деталей химического машиностроения, аэрокосмической промышленности и энергетики.

К методам получения объемных изделий из алюминидов никеля относят искровое плазменное спекание (SPS), горячее прессование, горячую экструзию и др. Однако низкая пластичность интерметаллидов при комнатной температуре затрудняет их обработку. Применение различных способов нанесения покрытий из алюминидов никеля на готовые детали исключает проблемы, связанные с обработкой хрупких интерметаллидных соединений, при этом покрытия будут обеспечивать защиту изделий от коррозии, эрозии и износа в конкретных условиях.

В последнее время возрос интерес к изучению свойств покрытий, полученных воздушно-плазменным напылением порошковых материалов. К преимуществам этого метода можно отнести высокую температуру плазменной струи, что позволяет формировать покрытия даже из тугоплавких материалов, возможность нанесения покрытий на поверхность любой сложности и низкую себестоимость. На сегодняшний день наиболее распространённым способом ввода порошка в плазменную струю является точечный радиальный ввод. Реализация этого варианта способствует возникновению неоднородностей полей температуры и скорости плазменного потока, что приводит к одновременному существованию в его сечении частиц, имеющих значительные отличия по тепловой и кинетической энергии. Это значительно снижает качество покрытий: они характеризуются высокой пористостью (до 15%) и наличием оксидных пленок. В настоящей работе для повышения качества формируемых покрытий ввод порошка в



плазменную струю осуществляли при помощи оригинального, разработанного в ИТПМ СО РАН, узла кольцевого ввода.

Целью данной работы являлось изучение структуры и свойств покрытий из интерметаллида  $Ni_3Al$ , полученных при различных режимах плазменного напыления с использованием узла кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой.

Проведены теплофизические и технологические исследования эффективности нагрева частиц и напыления покрытий из порошков сплавов на основе никеля ПР-НХ16СР3 (Ni – основа; С – 0,75%; Cr – 16%; Si – 3,2%; В – 2,7%) и ПВ-Н85Ю15 (Ni – 85%; Al – 15%) при использовании узла радиально-кольцевой инжекции с газодинамической фокусировкой дисперсной фазы.

**Таблица 1. Параметры воздушно-плазменного напыления**

Характеристика	Значения									
	Партия 1					Партия 2				
№ режима	1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E
Ток дуги, А	100	140	170	200	230	100	140	170	200	230
Напряжение на дуге, В	255	235	228	223	220	255	235	228	223	220
Плазмообразующий газ	Воздух									
Транспортирующий и фокусирующий газы	Смесь воздуха и пропан-бутана					Воздух				
Защитный газ	Смесь воздуха и пропан-бутана									
Дистанция напыления, мм	170									

Режимы воздушно-плазменного напыления приведены в таблице 1. Перед нанесением покрытий поверхность труб подвергали пескоструйной обработке. Для снятия внутренних напряжений, возникающих в покрытиях, после напыления выполняли отжиг при температуре 350°C в течение 3 часов. Измерения температуры и скорости частиц напыляемого порошка проводились с помощью оригинальной системы экспресс-контроля, совместной разработки ИТПМ СО РАН и Югорского госуниверситета. Диагностическая система включает цифровую видеокамеру с установленным узкополосным светофильтром (яркостный канал), регистрирующую треки излучающих частиц материала, и фотоспектрометр оптического диапазона, регистрирующий суммарный спектр двухфазной струи. Измерения скорости частиц производятся время-пролетным методом, а температуры – с помощью подхода спектрально-яркостной пирометрии (СЯП). Погрешность измерения скорости индивидуальных частиц составляет  $\pm 1\%$ . Методическая погрешность измерения температуры частиц (связана со спектральной зависимостью излучательной способности материала) для условий

экспериментов составляет +60...+100 К, случайная погрешность измерений составляет  $\pm 2\%$ .

Микроструктуру напыленных покрытий исследовали при помощи оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m. Более глубокие структурные исследования покрытий и частиц порошка проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Фазовый состав напыляемого порошка и плазменных покрытий изучали с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA. Пористость покрытий оценивали при помощи программного обеспечения Axio Vision Multiphase (Carl Zeiss).

Микротвёрдость покрытий определяли по ГОСТ 9450-76. Измерения проводили на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 50 г. Для определения среднего значения микротвёрдости на одно покрытие наносили не менее 15 отпечатков. Экспериментальные результаты анализировали с использованием методов статистической обработки.

Изнашивание образцов с покрытиями проводили в условиях трения скольжения со смазочным материалом по схеме диск-плоскость. Для проведения исследований поверхность образцов со стороны нанесенного покрытия полировали до шероховатости не грубее  $Ra=0,32$  мкм. В качестве индентора использовали диск из закаленной и отпущенной стали 45 (HRC 50). Нагрузка на индентор составляла 100 Н, скорость вращения диска – 300 об/мин. Время изнашивания – 3 часа.

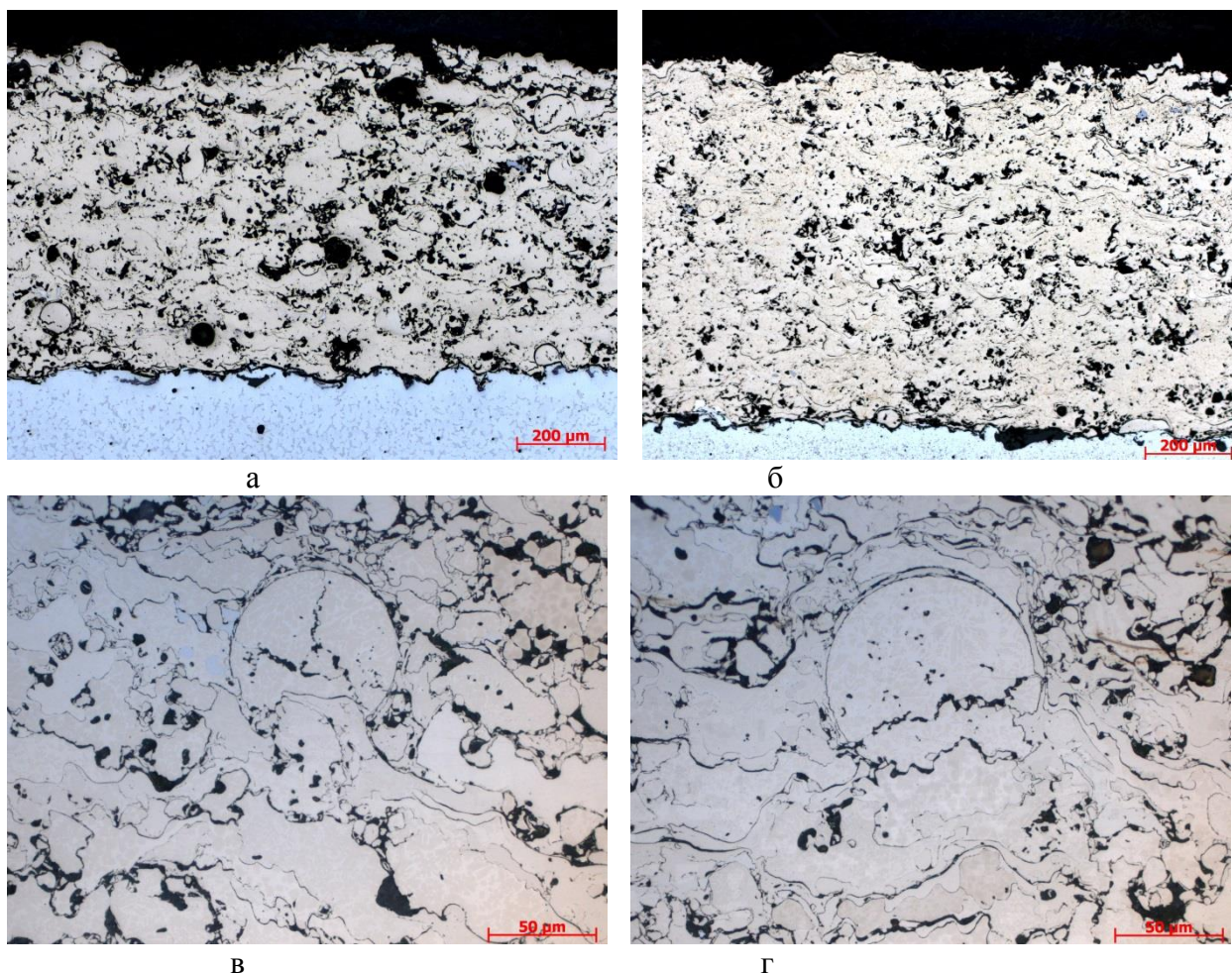
Результаты измерения скорости и температуры частиц напыляемого материала в струе на дистанции напыления 170 мм приведены в таблице 2. Объем статистической выборки для каждого режима составлял 5...7 тысяч частиц, распределения во всех случаях имеют нормальный вид. В таблице использованы следующие обозначения величин:  $m$  – среднее значение,  $\sigma$  – выборочное среднеквадратическое отклонение. Можно отметить, что нижней границей скорости и температуры частиц в каждом режиме напыления условно можно считать величину  $m - 2\sigma$ .

**Таблица 2. Значения скорости и температуры частиц в различных режимах напыления (дистанция 170 мм)**

№ режима	1А		1В		1С		1D		1E	
	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$
Скорость, м/с	07	0	43	1	56	5	62	2	61	2
Температура, К	226	73	323	53	331	36	353	37	333	38
№ режима	2А		2В		2С		2D		2E	
	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$
Скорость, м/с	07	1	46	1	68	0	72	7	74	2
Температура, К	238	95	336	85	377	57	384	49	386	45

Как можно видеть, при напылении на токах 170... 230 А средняя скорость частиц имеет значения на уровне 260... 270 м/с, а при снижении тока до 100... 140 А происходит не только падение средней скорости частиц  $m$  на 20...50 м/с, но и увеличение стандартного отклонения  $\sigma$  на 10...20 м/с. Обычно в газотермическом напылении снижение скорости частиц приводит к повышению пористости покрытий. Средняя температура частиц на всех режимах, за исключением токов 100 А, примерно одинакова и составляет 2330...2380 К. Можно отметить, что увеличение рабочего тока в целом приводит к снижению разброса температуры и скорости частиц (среднеквадратического отклонения), то есть обеспечивает более однородные параметры напыляемых частиц.

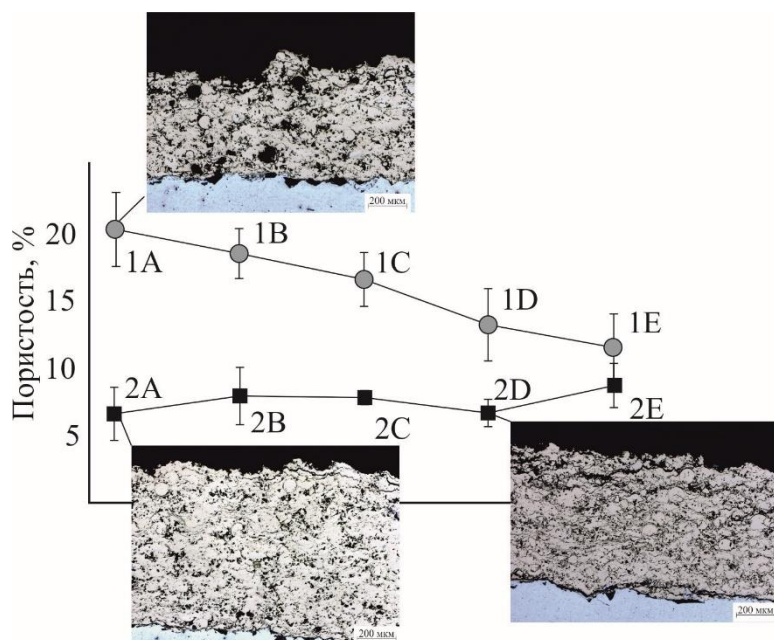
Результаты металлографических исследований свидетельствуют о неоднородности структуры полученных покрытий, связанной с неравномерностью нагрева частиц порошка в плазменной струе. В материале покрытий встречаются слабдеформированные частицы и частицы, которые в процессе напыления расплавились и интенсивно растекались по поверхности основы, что характерно для термических способов напыления. Общий вид плазменных покрытий из алюминид никеля, полученных методом оптической микроскопии, приведён на рис. 7. Толщина всех покрытий составляет 600...800 мкм.



**Рис. 7. Структура покрытий из  $Ni_3Al$ : режимы 1В (а) и 2В (б-г).**

Материал покрытий первой партии характеризуется выкрошившимися при подготовке микрошлифов частицами (рис. 7, а), что свидетельствует о слабой когезии. Согласно металлографическому анализу, выкрошившиеся частицы в покрытиях второй партии не наблюдаются (рис. 7, б). В результате микроструктурного анализа было выявлено, что в стыках между частицами образуются поры сложной формы, а узкие вытянутые поры располагаются по границам частиц. Кроме того, внутри слабдеформированных частиц наблюдаются трещины, которые образуются при соударении не достаточно нагретых частиц о подложку или остывший материал сформированного покрытия, что свидетельствует о низкой пластичности напыляемого материала (рис. 7, в, г).

Влияние режимов плазменного напыления на пористость покрытий представлено на рис. 8. Согласно полученным данным, пористость покрытий первой партии образцов (с использованием пропан-бутана) значительно выше, чем второй. При напылении покрытий первой партии наблюдается монотонное снижение пористости с увеличением тока дуги. Максимальные значения пористости (20,38 %) были зафиксированы на минимальном токе 100 А (режим 1А), минимальные (10,2 %) на токе 230 А (режим 1Е).

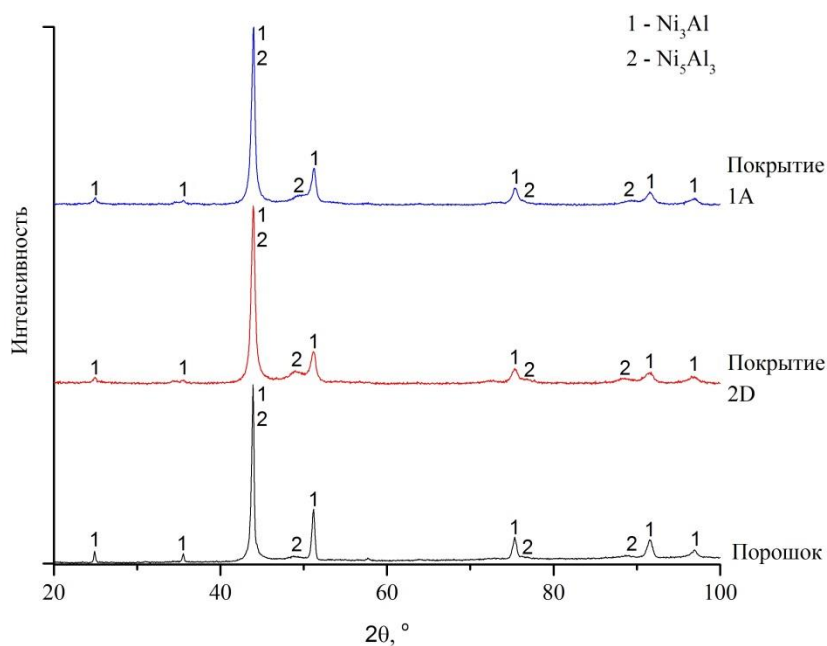


**Рис. 8. Влияние режимов напыления на пористость покрытий**

Величина пористости покрытий второй партии ниже, кроме того, пористость слабо зависит от тока дуги плазмотрона (рис. 8). Наиболее плотные покрытия были получены на токах дуги 100 А (режим 2А) и 200 А (режим 2D) (5,3 и 5,77 %, соответственно). Следует отметить, что эффективность напыления порошка по режиму 2А не велика: значительная часть нерасплавленных частиц не участвует в формировании покрытия.

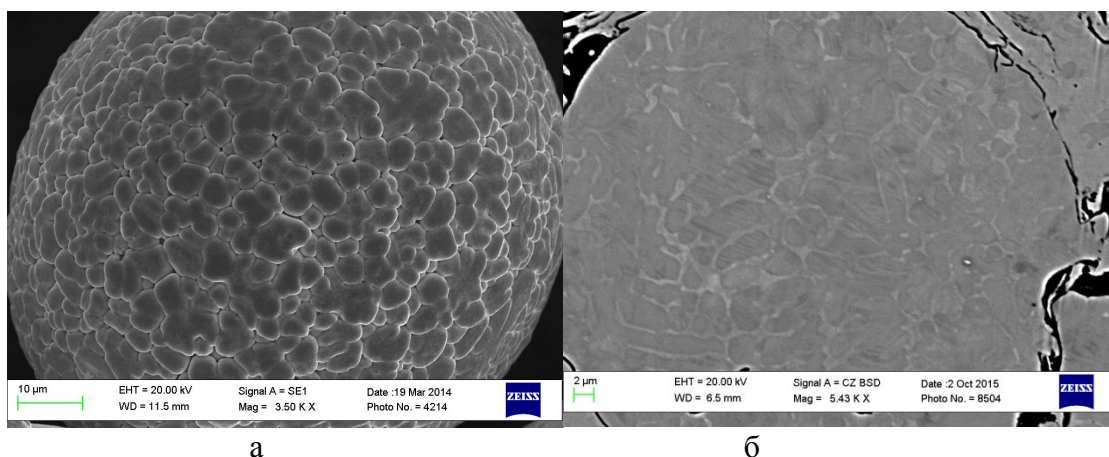
При проведении рентгенофазового анализа было установлено, что фазовый состав исходного порошка соответствует фазовому составу покрытий. Основной фазой является алюминид никеля с химической формулой  $Ni_3Al$ . Кроме того, в структуре содержится фаза  $Ni_5Al_3$ . В качестве примера на рис. 9 представлены дифрактограммы исходного порошка и покрытий, полученных по разным режимам. Несмотря на то, что температуры нагрева частиц порошка в плазменной струе высоки (таблица 2), скорость их кристаллизации на подложке очень высока, поэтому фазовые превращения при плазменном напылении не успевают проходить.





**Рис. 9. Дифрактограммы частиц порошка и покрытий**

Данные, полученные при помощи рентгенофазового анализа, подтверждаются также и растровой электронной микроскопией. Изображение частицы исходного порошка, полученное с использованием растровой электронной микроскопии, приведено на рис. 10, а. Видно, что частица состоит из зерен размерами менее 10 мкм. Для сравнения приведено более детальное изображение структуры полученных покрытий в режиме обратноотраженных электронов (рис. 10, б). Частицы в покрытии также характеризуются зеренной структурой: наблюдаются темно-серые зерна, часть которых имеет пластинчатое строение, и светло-серая фаза, расположенная по границам зерен. Возможности оборудования не позволяют оценить химический состав отдельных фаз из-за их небольших размеров.



**Рис. 10. Изображение частиц напыляемого порошка (а) и структуры покрытия (б)**

При проведении микрорентгеноспектрального анализа было выявлено, что количество Ni в покрытиях составляет около 83 мас. %. На основании полученных данных, а так же диаграммы состояния Ni-Al, при комнатной температуре в интервале 82...85 мас. % Ni возможно существование как отдельных химических соединений Ni<sub>3</sub>Al и Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>, так и механической смеси Ni<sub>3</sub>Al-Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>. Согласно данным работы [4] можно предположить, что темно-серые зерна представляют собой механическую смесь Ni<sub>3</sub>Al-Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>. По границам зерен выделяется избыточная фаза Ni<sub>3</sub>Al. Авторы работ [5, 6] утверждают, что для Ni-Al сплавов с содержанием более 61,5 ат. % (~77 мас. %) Ni при закалке с высоких температур характерно бездиффузионное мартенситное превращение с образованием тетрагонального мартенсита. При содержании 64 ат. % (~82 мас. %) Ni и более мартенсит образуется и после медленного охлаждения одновременно с формированием фазы Ni<sub>3</sub>Al. В дальнейшем, для выявления особенностей тонкого строения плазменных покрытий, предполагаются дополнительные исследования с использованием просвечивающей электронной микроскопии.

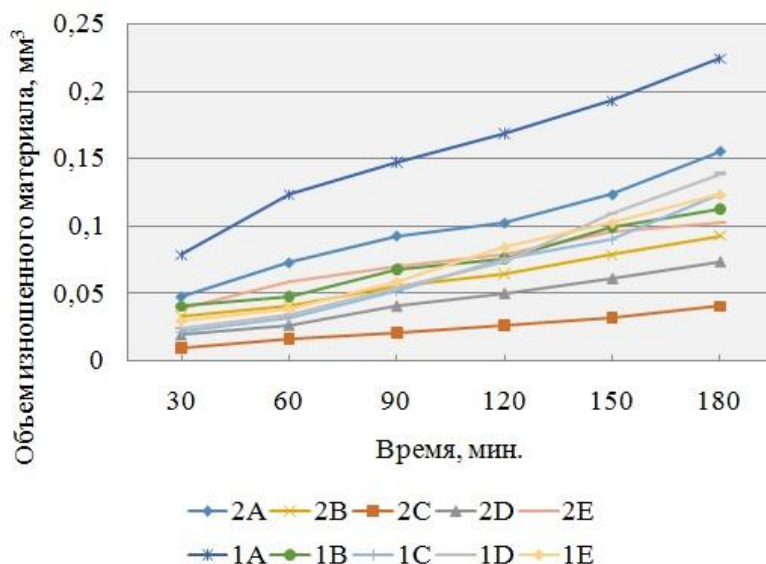
Результаты определения микротвёрдости покрытий, сформированных плазменным напылением на разных режимах, представлены в таблице 3.

**Таблица 3. Микротвёрдость покрытий**

Режимы	1A	1B	1C	1D	1E
Микротвёрдость, HV	579 ± 98	694 ± 97	681 ± 116	635 ± 98	675 ± 59
Режимы	2A	2B	2C	2D	2E
Микротвёрдость, HV	543 ± 73	581 ± 98	630 ± 69	609 ± 60	573 ± 89

Согласно полученным данным, значения микротвёрдости покрытий первой партии незначительно выше, чем второй, в среднем микротвёрдость покрытий первой партии составляет 650 HV, второй – 590 HV. Это можно было бы объяснить более высоким уровнем пластической деформации в случае более высоких значений скорости частиц. Но, как видно из таблицы 2, отличия в скорости частиц крайне незначительны. Указанные значения несколько превышают уровень микротвёрдости частиц исходного порошка и плазменных покрытий из Ni<sub>3</sub>Al, полученных с использованием плазматронов с точечным вводом порошка. Повышение микротвёрдости, при напылении плазматроном с использованием узла кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой, уже отмечалось ранее при напылении покрытий системы Ni-Cr-Si-B).

Результаты триботехнических испытаний покрытий в условиях трения скольжения со смазкой представлены на рис. 11.



**Рис. 11. Износостойкость покрытий**

Максимальный уровень износостойкости зафиксирован при испытаниях покрытий, полученных по режиму 2С. Минимальная износостойкость, характерна для покрытий, сформированных по режиму 1А. Стоит отметить, что износостойкость покрытий второй партии выше, чем первой, что можно объяснить более сильной когезией напыленных частиц в этих покрытиях. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что увеличение микротвердости способствует повышению износостойкости покрытий данного состава в реализованных условиях трения-скольжения.

**Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:**

1. Пористость покрытий, полученных с использованием смеси воздуха и пропан-бутана только в качестве защитного газа значительно ниже, чем покрытий, полученных с использованием смеси воздуха и пропан-бутана в качестве транспортирующего, фокусирующего и защитного газов. Наиболее плотные покрытия (5,77 %) были получены на токе 200 А с пониженным количеством пропан-бутана (режим 2D).
2. На основании данных рентгенофазового анализа установлено, что фазовый состав напыленных покрытий и исходного порошка одинаков. Основной фазой является соединение  $Ni_3Al$ . Кроме того, в структуре содержится фаза  $Ni_5Al_3$ .
3. В результате измерения микротвердости было выявлено, что микротвердость покрытий, полученных с использованием смеси воздуха и пропан-бутана в качестве транспортирующего, фокусирующего и защитного газов, незначительно выше, чем покрытий, полученных с использованием смеси воздуха и пропан-бутана только в качестве защитного газа, (в среднем 650 HV и 590 HV, соответственно). Микротвёрдость полученных покрытий превышает уровень микротвердости частиц исходного порошка и литературных данных по плазменным покрытиям из  $Ni_3Al$ .



4. Максимальная износостойкость характерна для покрытий, полученных с использованием смеси воздуха и пропан-бутана только в качестве защитного газа и токе дуги 170 А (2С). Наименьший уровень износостойкости зафиксирован при испытаниях покрытий, полученных с использованием смеси воздуха и пропан-бутана в качестве транспортирующего, фокусирующего и защитного газов и токе дуги 100 А (режим 1А). Полученные данные хорошо согласуются с результатами измерения микротвердости. Таким образом, с точки зрения получения более плотных покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, оптимальными режимами плазменного напыления порошка марки ПН85Ю15 является ток от 140 до 200 А и использование смеси воздуха и пропан-бутана только в качестве защитного газа.

### **Блок 3: Исследования физико-химических процессов в электродуговых технологиях переработки природного и техногенного сырья.**

#### **3.1. Проектирование и создание лабораторного плазмотрона с МЭВ мощностью до 5 МВт и с рабочим давлением воздуха в дуговом канале до 50 атм. Исследование напряженности электрического поля на начальном и турбулентном участке столба электрической дуги высокого давления.**

Основным инструментом при испытании материалов и моделировании горения в аэрокосмической промышленности в настоящее время являются генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны), позволяющие получать высокие температуры при требуемых расходах и составах газов [7,8]. На данный момент для этих целей в основном используются электродуговые плазмотроны постоянного или переменного тока. Практически все используемые в настоящее время плазмотроны работают на начальном участке столба дуги (в них практически отсутствуют турбулентные участки столба дуги) и это обуславливает их технические характеристики. Тепловые потери столба электрической дуги на ее начальном участке определяются излучением. С ростом давления и тока дуги происходит резкий рост излучения столба дуги, что приводит к увеличению доли радиационных потерь столба дуги до 25–30%. В сумме с тепловыми потерями на электродах плазмотрона это и обуславливает типовые значения КПД используемых плазмотронов — 60–70%, а в целом ряде случаев еще меньше. Без изменения конструктивной схемы этих плазмотронов увеличить КПД невозможно.

К настоящему времени накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, относящийся к исследованию свойств электрической дуги атмосферного и повышенного давления, определены режимы ее горения [3]. Получены данные по величине напряженности электрического поля в столбе дуги в различных газах на ее начальном и турбулентном участках. Установлены физические процессы, определяющие тепловые потери столба дуги на ее начальном и турбулентном участках. Получены обобщенные уравнения для расчета энергетических характеристик электрической дуги в различных газах [3, 9]. Однако все это в значительной степени относится к электрической дуге атмосферного давления и в то же время отсутствуют надежные данные по энергетическим характеристикам столба электрической дуги высокого давления. Причем это относится как к начальному, так и к турбулентному участкам электрической дуги. Имеющиеся в литературе данные об излучении столба электрической дуги противоречивы и относятся преимущественно к ее начальному (ламинарному) участку. Предполагается,

что излучение столба дуги при ламинарном и турбулентном режиме ее горения одинаково. В то же время в литературе имеются разрозненные экспериментальные данные, указывающие на возможность управления излучением столба дуги на участке развитого турбулентного течения, однако систематические исследования в этом направлении не проводились, неизвестны границы возможностей этого явления и способы его управления.

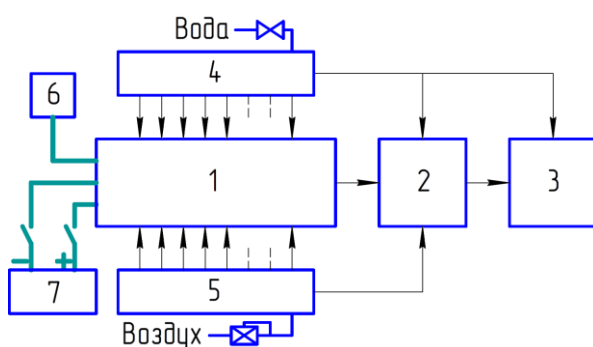
Как известно, напряженность электрического поля столба дуги на ее турбулентном участке в 2–3 раза выше, чем на начальном участке [9]. Таким образом, использование турбулентного участка столба дуги в плазмотроне может увеличить КПД плазмотрона.

Все это свидетельствует об актуальности исследования энергетических характеристик столба электрической дуги на ее начальном и турбулентном участке.

### 3.1.1. Описание плазменного стенда и его составных частей

Для исследования энергетических характеристик электрической дуги атмосферного и высокого давления был создан плазменный стенд. Функциональная схема плазменного стенда представлена на рис. 12. Он состоит из электродугового плазмотрона 1; смесителя (газов) 2, сверхзвукового сопла 3, блоков подачи (распределения) охлаждающей воды 4 и воздуха 5, и системы запуска плазмотрона 6. Электроснабжение плазмотрона производится от тиристорного выпрямителя 7 — ПВТ2 800/8000, установленного в машинном зале ИТПМ СО РАН.

*Рис. 12. Функциональная схема плазменного стенда*



Сжатый до высокого давления воздух из турбокомпрессорной станции ИТПМ СО РАН через блок распределения 5 подается в плазмотрон и смеситель 2. В плазмотроне воздух нагревается до требуемой температуры при помощи электрической дуги постоянного тока.

Подача постоянного (выпрямленного) напряжения от тиристорного источника питания 7 производится через два (высоковольтных) разъединителя. Инициирование дуги производится при помощи системы запуска плазмотрона 6.

Нагретый в плазмотроне 1 воздух поступает в смеситель 2. Функцией смесителя является разрушение высокотемпературного ядра нагретого воздуха и выравнивание его температурного профиля перед его поступлением в сверхзвуковое сопло 3. Функцией сверхзвукового сопла 3 является обеспечение требуемого давления торможения воздуха. Регулировка давления торможения путем изменения геометрии (проходного сечения) критического сечения сверхзвукового сопла.

Измерение давления торможения производится при помощи образцового манометра МО 11202 подключенного к форкамере сверхзвукового сопла. Измерение температуры торможения производится при помощи платинородий-платинородиевой (ПР) термопары.

Электродуговой плазмотрон 1, входной и выходной фланцы смесителя 2, и сверхзвуковое сопло выполнены охлаждаемыми. Подача технической воды на охлаждение производится через блок распределения воды 4.

### 3.1.2. Электродуговой плазмотрон

Для нагрева воздуха используется электродуговой плазмотрон постоянного тока линейной схемы с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) и межсекционным вдувом газа. Схема плазмотрона представлена на рис. 13. Фотография плазмотрона приведена на рис. 14.

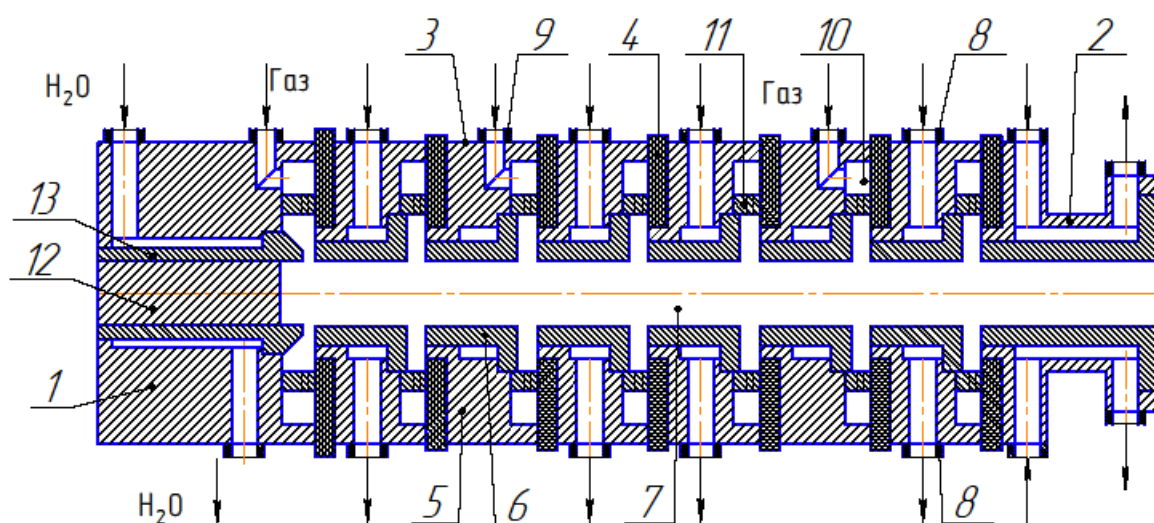
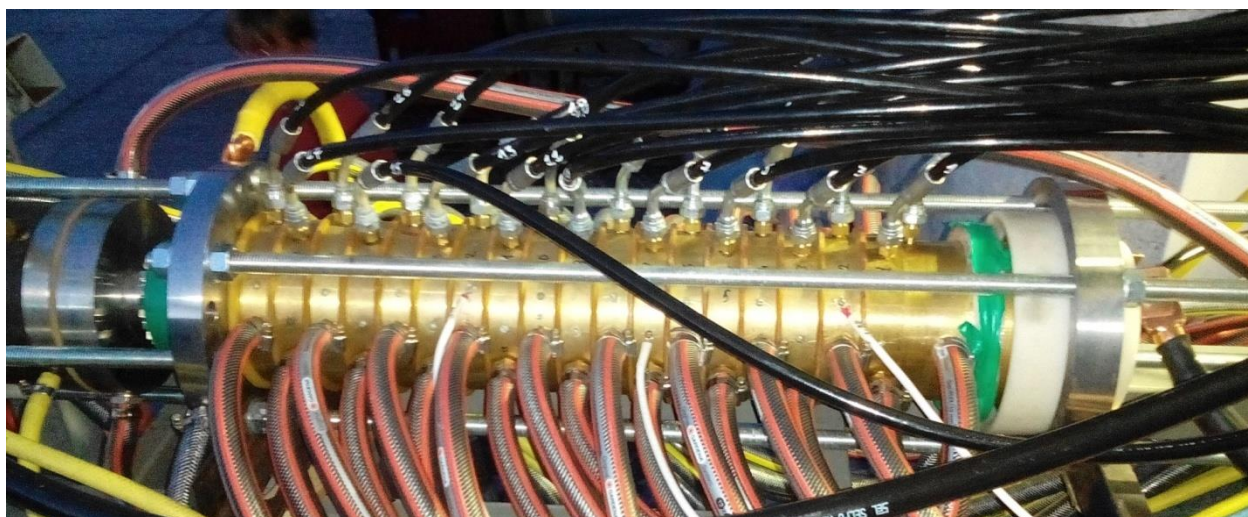


Рис. 13. Схема электродугового плазмотрона



*Рис. 14. Плазмотрон с МЭВ мощностью до 5 МВт*

Плазмотрон состоит из катодного 1 и анодного 2 электродных узлов разделенных межэлектродной вставкой. Катодный узел имеет две модификации: с катодом торцевого типа 12, и с полым цилиндрическим катодом 13. В качестве торцевого электрода используется графитовая вставка в полый цилиндрический электрод. Использование торцевого графитового катода позволяет, как было установлено предыдущими исследованиями, осаждать углерод из газовой фазы на поверхность и реализовать режим его самовосстановления, либо минимизировать присутствие конденсированной фазы в генерируемой струе плазмы. В свою очередь, межэлектродная вставка состоит из последовательно установленных взаимозаменяемых секций 3 отделенных друг от друга изоляторами 4. Секции выполнены разборными и состоят из корпуса 5 и медной вставки 6. Подобная конструкция секции позволяет в случае необходимости изменять геометрию дугового канала 7 плазмотрона без изменения его общей конструкции. Кроме того, в случае необходимости, это позволяет путем увеличения количества установленных секций увеличивать (регулировать) мощность плазмотрона, не увеличивая (меняя) при этом величину его тока.

Каждая секция, а так же катодный и анодный узлы плазмотрона имеют индивидуальное охлаждение. Слив и подача воды производится через патрубки 8. Наличие индивидуального охлаждения позволяет получать локальные величины тепловых потоков от электрической дуги в стенку дугового канала, а так же определять локальные энергетические характеристики столба электрической дуги на его начальном и турбулентном участках.

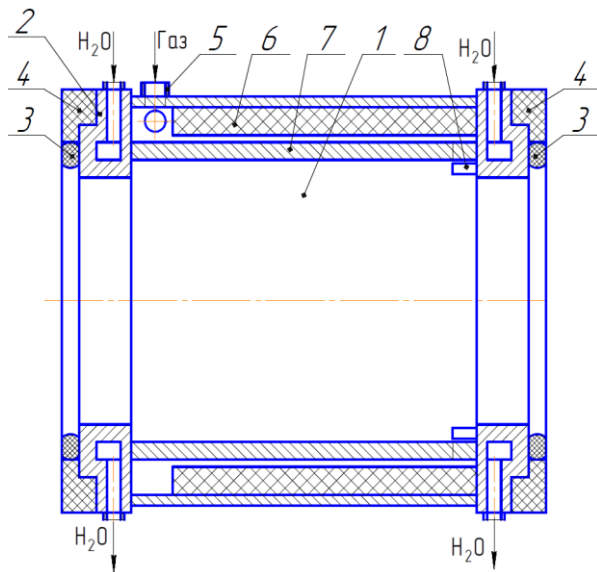
Между секциями 3 производится вдув газа. Газ (воздух) через штуцер 9 поступает в коллектор 10 и через завихритель 11 поступает в дуговой канал плазмотрона. Межсекционный вдув воздуха, производится с двумя целями:

- Обеспечение электрической прочности меж секционных зазоров для предотвращения образования двойной дуги;
- Обеспечение газовой завесы стенок дугового канала плазмотрона для повышения КПД плазмотрона.

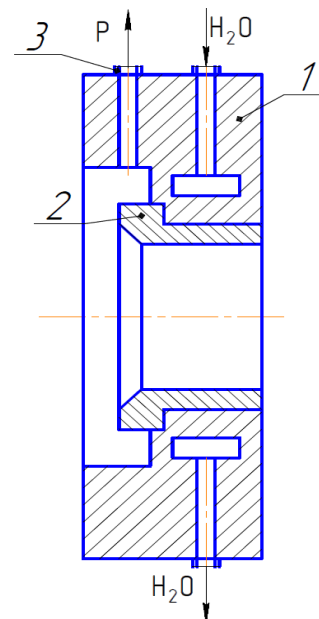
### **3.1.3. Смеситель**

Схема смесителя представлена на рис. 15. Он представляет собой выполненную из нержавеющей стали цилиндрическую камеру 1. На входе и на выходе смесителя установлены водоохлаждаемые фланцы 2, которые обеспечивают ее стыковку с плазмотроном и сверхзвуковым соплом. Герметизация стыков обеспечивается при помощи колец 3 выполненных из силиконовой резины. Смеситель изолирован от плазмотрона и сверхзвукового сопла при помощи изоляторов 4. Изоляторы установлены с целью предотвращения повреждения электрической дугой смесителя и сверхзвукового сопла. Воздух в смеситель подается через тангенциально расположенный патрубок 5. Подаваемый в смеситель воздух, проходя по кольцевой щели между утеплительным вкладышем 6 и внутренней стенкой 7, охлаждает последнюю, и через тангенциально расположенные пазы 8 поступает во внутренний канал смесителя, где смешивается с потоком плазмы истекающей из анодного узла плазмотрона.

**3.1.4. Сверхзвуковое сопло** Схема сверхзвукового сопла представлена на рис. 16. Оно представляет собой водоохлаждаемый фланец 1, по оси которого устанавливается сменный медный вкладыш 2. Величина сечения в сменном вкладыше определяет давление торможения потока нагретого воздуха. Сопло имеет патрубок 3 для измерения давления в форкамере.



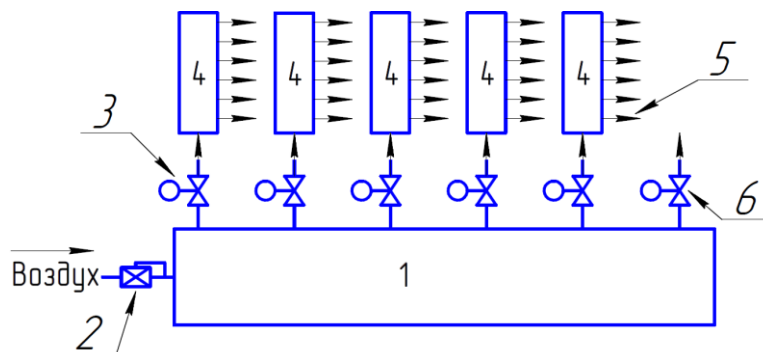
**Рис. 15. Схема смесителя**



**Рис. 16. Схема сверхзвукового сопла**

### 3.1.5. Блок распределения воздуха

Схема блока распределения воздуха представлена на рис. 17. Он представляет собой напорный коллектор 1, через редуктор 2 подключенный к сети высокого давления. На напорном коллекторе, через пневматические клапаны 3 установлены пять распределительных коллекторов 4. На каждом из распределительных коллекторов имеется шесть патрубков 5, через которые воздух подается на секции плазмотрона. Контроль расхода газа производится путем установки критических шайб на выходе каждого из патрубков 5. Кроме того на напорном коллекторе установлен пневматический клапан 6 для подачи большого (до 2 кг/с) расхода воздуха.



**Рис. 17. Схема блока распределения воздуха**

### 3.1.6. Блок распределения воды

Схема блока распределения воды представлена на рис. 18. Он представляет собой напорный 1 и сливной 2 коллекторы, подключенные сети оборотной технической воды с рабочим давлением до 1 МПа. На напорный коллектор установлены 24 шаровых крана 3 через которые подается техническая вода на охлаждаемые элементы плазменного стенда. Для контроля температуры воды и величины теплового потока в охлаждаемый элемент каждая сливная линия оснащена датчиками температуры 4 (термосопротивлениями ТСМ) и расходомерами 5.

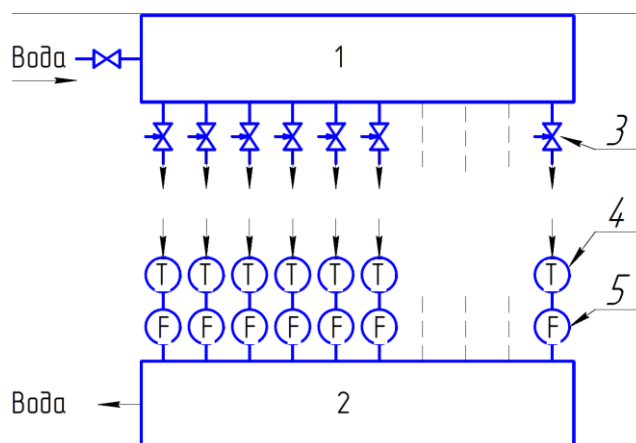


Рис. 18. Схема блока распределения воды

### 3.1.7. Схема (подключения) запуска (пуска) плазмотрона

Схема подключения и запуска плазмотрона представлена на рис 19.

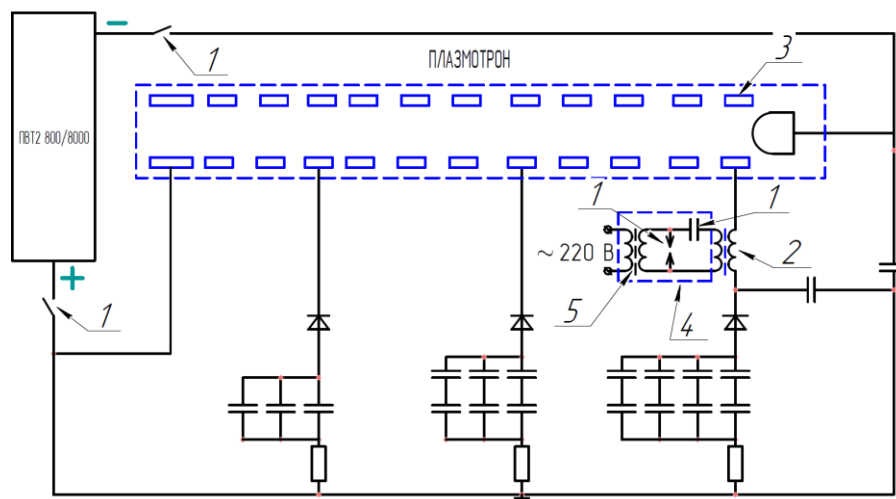


Рис. 19. Схема электроснабжения плазмотрона

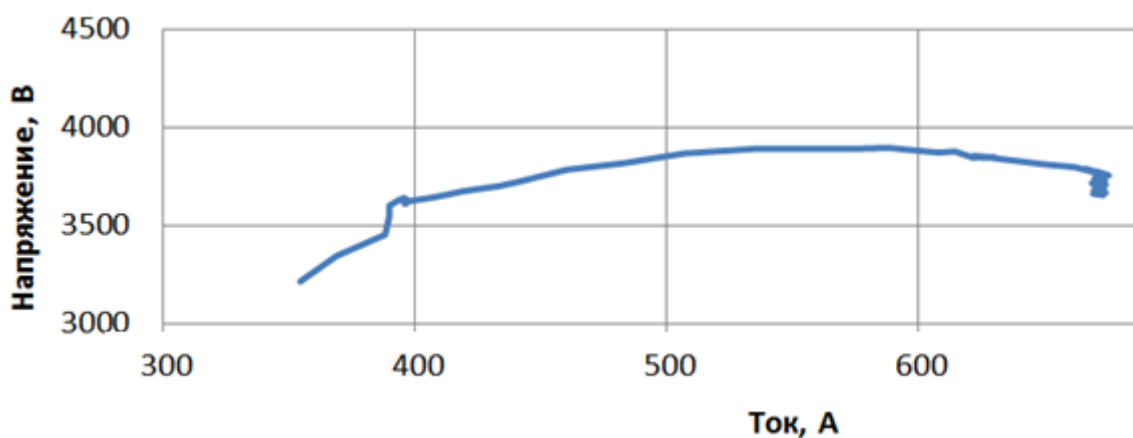
Подвод выпрямленного напряжения к плазмотрону производится через разъединители 1. Схема пуска плазмотрона – последовательная, при помощи пускового трансформатора 2 установленного в цепи секции 3 плазмотрона. Подача напряжения на



первичную обмотку пускового трансформатора 2 производится от осциллятора 4 изготовленного на базе высоковольтного трансформатора 5. Конденсатор 6, разрядник 7 и первичная обмотка пускового трансформатора 2 образуют колебательный контур, в котором генерируются пакеты высоковольтных импульсов напряжения.

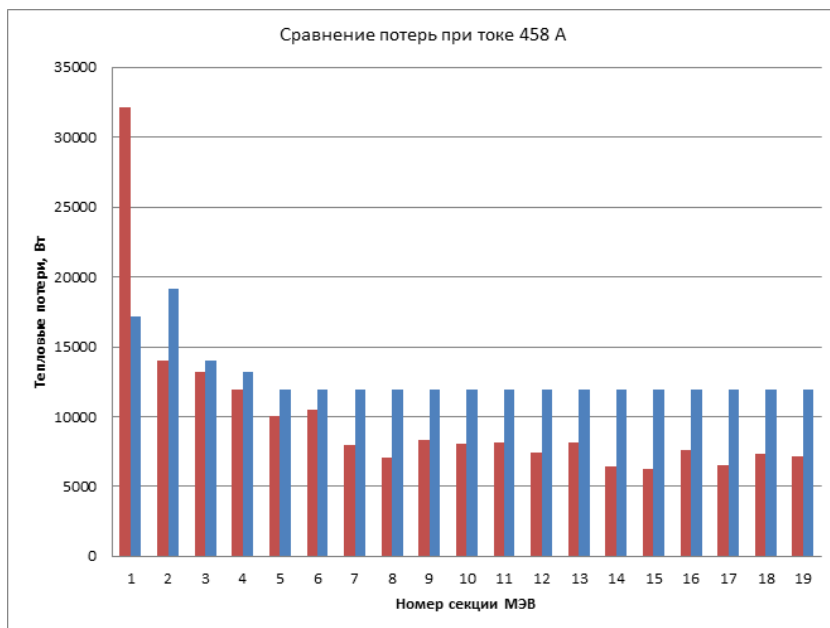
Для сохранения информации о параметрах плазмотрона изготовлена 96 канальная система регистрации фиксирующая величины расходов и температуры воды на каждую секцию МЭВ, расходов воздуха, напряжение на плазмотроне, ток дуги, а так же потенциалы каждой из секций МЭВ.

На рис. 20. Приведена вольтамперная характеристика плазмотрона при расходе плазмообразующего газа – воздуха: 0,5 кг/с.

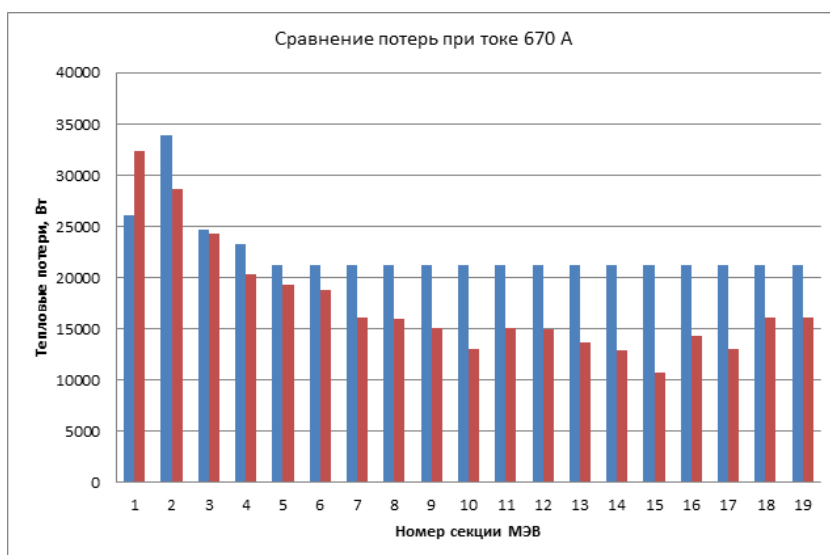


*Рис. 20. Вольтамперная характеристика плазмотрона с МЭВ при расходе воздуха на межсекционный вдув 0,5 кг/с*

На рис. 21. Приведено сравнение тепловых потерь в секции межэлектродной вставки полученных в эксперименте с расчетной величиной тепловых потерь излучением столба электрической дуги для токов 458 А и 670 А.



а



б

**Рис. 21. Сравнение тепловых потерь в секции межэлектродной вставки с расчетными потерями излучением столба электрической дуги. Синие столбцы – расчетные тепловые потери в секцию МЭВ за счет излучения столба дуги; красные столбцы – экспериментально измеренные интегральные тепловые потери в секции МЭВ.**

Как видно из рис. 21, на начальном участке столба дуги (секции 1-6) тепловые потери в секции МЭВ примерно соответствуют потерям излучением столба дуги. Однако для турбулентного участка столба дуги - секции 7-19, экспериментально измеренные тепловые потери оказались существенно ниже расчетных потерь излучением столба дуги. Это свидетельствует о том, что на участке развитого турбулентного течения, тепловые потери излучением столба дуги существенно меньше, чем на начальном участке столба

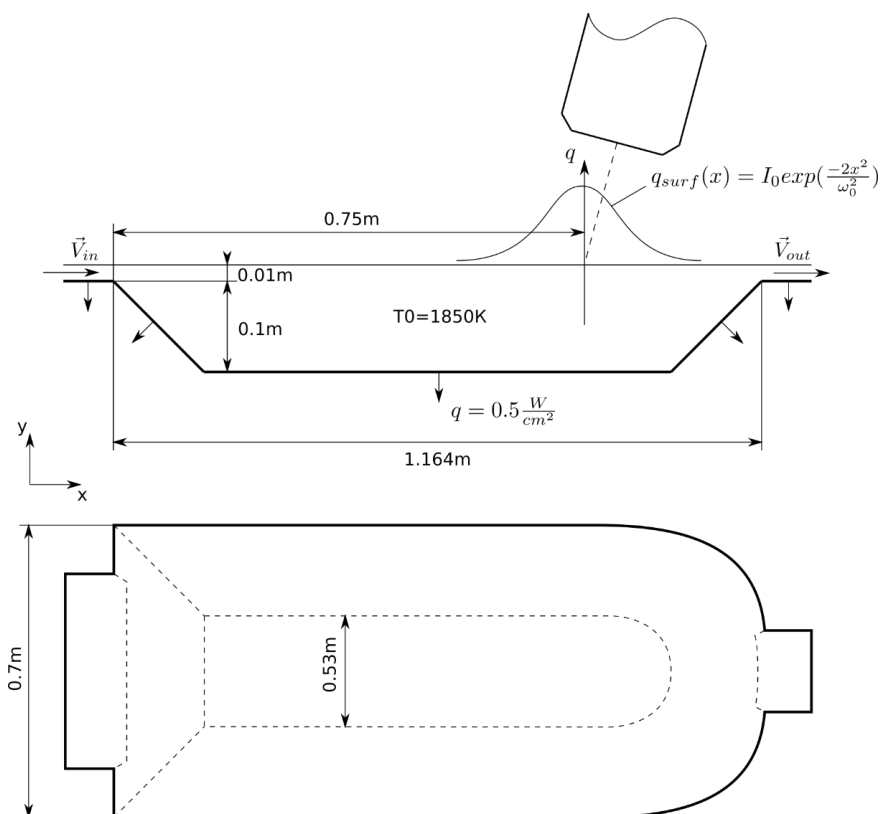
дуги. Таким образом, показано, что использование плазмотрона с МЭВ позволит существенно увеличить КПД генерации потоков плазмы высокого давления по сравнению с используемыми в настоящее время плазмотронами, работающими на начальном участке столба электрической дуги.

**Вывод:** Создан плазмотрон для исследования энергетических характеристик электрической дуги атмосферного и высокого давления на её начальном и турбулентном участках. Плазмотрон имеет индивидуальные линии контроля и регистрации расхода газа и параметров охлаждающей воды на каждую секцию и позволяет получать, отсутствующие в настоящее время, данные об эмиссионных и энергетических характеристиках электрической дуги атмосферного и высокого давления на её начальном и турбулентном участках при токе 200÷900 А, что позволит в будущем разрабатывать плазмотроны высокого давления с высоким КПД.

### 3.2. Численное моделирование перемешивания и осаждения примесей металлов в плазмотермическом реакторе при воздействии на расплав плазменной токовой струи

В целом ряде технологических процессов, связанных с плавлением техногенного и природного сырья существует необходимость выделения из получаемого расплава шлака металлической фазы. Полнота выделения из расплавленного шлака целевых продуктов в определяющей степени зависит от температурного режима и гидродинамики ванны расплава. Экспериментальные исследования процессов экстракции сложны и дорогостоящи. Поэтому задача создания физико-математической модели ванны расплава в плавильной камере, взаимодействующей с потоком плазмы, и ею управляемой является весьма актуальной.

На этапе 2016 года доработано программное обеспечение и проведены численные расчеты по динамике расплава шлака в плавильной камере и осаждению частиц платины в трехмерной постановке.



**Рис. 22. Схема плавильной камеры**

Схема плавильной камеры показана на рис. 22. В плавильную камеру поступает расплав шлака с частичками платины со скоростью  $V_{in}$ . В камере частички платины движутся в конвективных течениях и постепенно оседают под действием силы тяжести в принимающий металл. Излишки шлака удаляются через слив.

Ранее на этапе 2015 года было показано, что расплав стали, находящийся на дне ванны, практически не движется и граница раздела сталь-шлак представляет собой горизонтальную линию. На данном этапе расчетная область покрывает только часть ванны со шлаком, а на границе раздела предполагается, что скорость равна нулю.

Движение расплава описывается на основе решения трехмерных уравнений Навье-Стокса в приближении несжимаемой жидкости и уравнения переноса энергии.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \rho \vec{g} (1 + \beta (T - T_0)) + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T \vec{V}) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p \rho} \nabla T \right),$$

где  $\vec{v}$  – скорость,  $p$  – давление,  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения,  $\rho$  – плотность,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $T$  – температура,  $T_0$  – температура относительно которой вычисляется плотность,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $c_p$  – коэффициент теплоёмкости,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения. Зависимость плотности от температуры и возникающая вследствие этого Архимедова сила учитывается в приближении Буссинеска.

Влияние частиц платины на течение расплава не учитывается. Движение частиц моделируется в Лагранжевой постановке.

$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{3}{8} \frac{\rho C_d}{\rho_p r_p} \left| \vec{V} - \vec{V}_p \right| (\vec{V} - \vec{V}_p) + \vec{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p},$$

$$C_d = \begin{cases} 0.424 & ; \text{Re} > 1000 \\ \frac{24}{\text{Re}} \left( 1 + \frac{1}{6} \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right) & ; \text{Re} \leq 1000 \end{cases},$$

где  $C_d$  – коэффициент сопротивления сферы в потоке жидкости,  $r_p$  – радиус частицы, а величины с индексом  $p$  относятся к частицам в расплаве.

Программное обеспечение для расчетов написано с применением программного пакета с открытым исходным кодом для численного моделирования гидродинамики сжимаемых и несжимаемых течений OpenFOAM.

Теплофизические параметры шлака и платины, используемые в расчетах, приведены в табл. 4. Воздействие плазмотрона моделировалось тепловым источником с мощностью 10 кВт и диаметром пятна 20 см.

**Таблица 4. Теплофизические параметры**

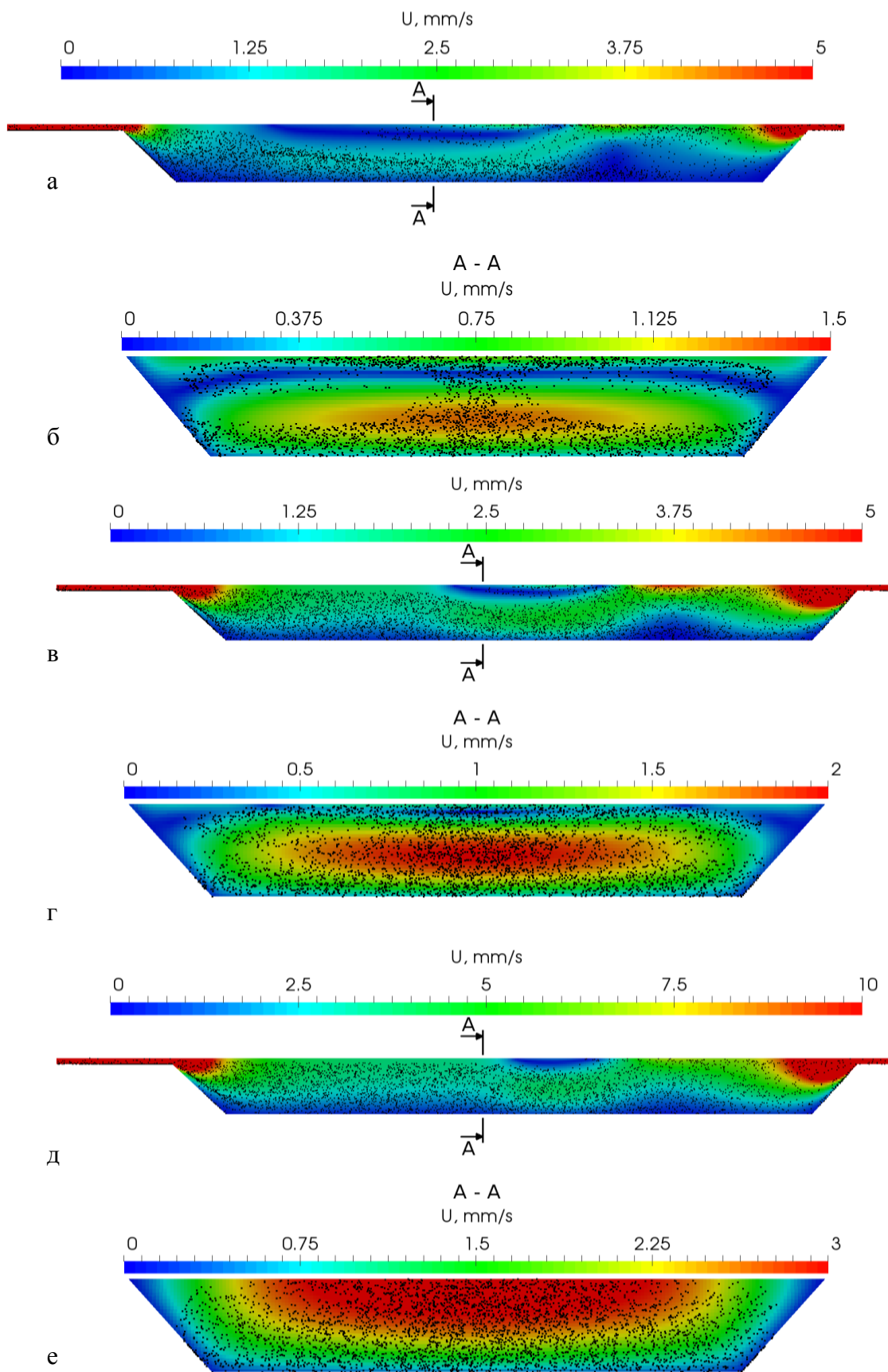
Параметр	Шлак	Платина
$\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	2800	21450
$\mu$ , Па·с	0.7	-
$\lambda$ , Вт / (м·К)	1.162	-
$c_p$ , Дж / (кг·К)	1600	-
$\beta$ , 1 / К	$1.96 \cdot 10^{-5}$	-

Были проведены расчеты с подачей расплава шлака 1.8 л/мин, 3.6 л/мин и 7.2 л/мин, что соответствует скоростям  $V_{in} = 1$  см/с, 2 см/с и 4 см/с. Скорость подачи материала в плавильную камеру это один из основных параметров, влияющих на её эффективность. С одной стороны, чем больше материала подается, тем больше платины попадает в камеру, но с другой стороны увеличивается скорость течения расплава и частички не успевают оседать и удаляются вместе со шлаком через слив. Расчет проводился до установления стационарной картины.

В табл. 5 приведены полученные в результате моделирования отношения массы осевших частиц к удаленным через слив. Полезный выход платины указан в предположении, что платина занимает 1% объема поступающего расплава. Поля скоростей и положения частиц показаны на рис. 23.

**Таблица 5. Эффективность плавильной камеры**

Расход шлака, л/мин	Массовая доля осевших частиц, %	Полезный выход платины, кг/мин
1.8	97.7	0.38
3.6	76.5	0.59
7.2	46.6	0.71



**Рис. 23. Поля скорости и положения частиц. Подача шлака: а, б – 1.8 л/мин; в, г – 3.6 л/мин; д, е – 7.2 л/мин. б, г, е – поле скорости в сечении А-А.**

Максимальный КПД плавильной камеры 97.7% мы видим в случае расхода шлака 1.8 л/мин. На рис. 23 а, б видно как частицы оседают по мере движения к сливу. Некоторая часть платины попадает в течение в верхней части ванны, вызванное эффектом Марангони, и удаляется через слив. С увеличением скорости течения расплава частицы оседают медленнее и КПД заметно падает, но вместе с тем значительно вырастает производительность процесса.

**Выводы:** Разработана инженерная методика расчета плавильных плазменодуговых камер. На основе открытого исходного кода создано программное обеспечение для расчета и исследования режимов осаждения примесей металлов в плазмотермическом реакторе. Проведены численные расчеты осаждения частиц платины в плавильной ванне для нескольких режимов течения и определены параметры, определяющие эффективность выделения полезного сырья.



### 3.3. Расчетно-экспериментальное исследование синтеза диоксида титана анатазной кристаллической модификации при предварительном смешении реагентов и в условиях встречной закалки

В связи с корректировкой планов НИР лаб. № 9 на 2016 г. (номер темы 0323-2014-0003, блок 3 «Исследования физико-химических процессов в электродуговых технологиях переработки природного и техногенного сырья») содержание работ было изменено и включает следующие пункты:

- 1) проведение теоретических и экспериментальных исследований высокотемпературного синтеза нанопорошков оксидных керамик ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ) в зависимости от режимных параметров плазмохимической установки;
- 2) адаптация расчетной модели и математическое моделирование плазмохимического синтеза наноразмерных частиц двуокиси кремния в струе азотной плазмы.

Соответственно, ожидаемые результаты с учетом указанной корректировки были следующие:

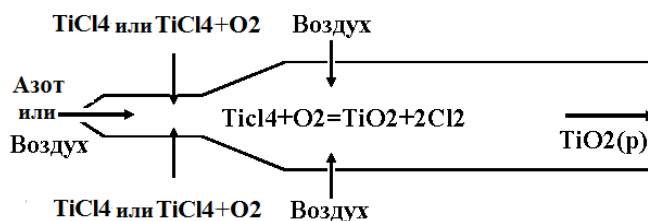
- 1) моделирование режимов синтеза диоксида титана, отличающихся газовым составом плазмообразующей струи и струй реагентов при различном расходе закалочной струи, что, в частности, влияло на глубину встречной закалки;
- 2) получение образцов порошков оксидных керамик ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ), анализ их фракционного и фазового состава в зависимости от глубины встречной закалки;
- 3) расчетное исследование плазмохимического синтеза наночастиц  $\text{SiO}_2$  с учетом состава кристаллических фаз в порошке.

Плазмохимия субмикронных порошковых материалов и покрытий является интенсивно развиваемым направлением. Хотя промышленное применение этого метода освоено достаточно давно, продолжают как теоретические, так и экспериментальные исследования механизмов нуклеации и роста частиц нанокристаллического диоксида титана в процессе их синтеза. В меньшей степени изучены вопросы управления процессом синтеза.

Одним из наиболее значимых факторов управления основными характеристиками порошка (фракционный и фазовый состав, морфология поверхности) является приведенная к диаметру канала  $D$  глубина встречной закалки  $h_v/D$  в результате взаимодействия сносящего потока горячего газа цилиндрического канала с развитой встречной струей, возникшей в результате столкновения закалочных струй, инжестируемых радиально через круглые отверстия. Ранее исследование газодинамики нереагирующих течений в данной постановке задачи (число струй  $n=8$ , диаметр отверстия

инжекции струи  $d=3$  мм,  $D=32$  мм) показало, что пороговое значение отношения гидродинамических напоров струй и сносящего потока  $J$ , при котором начинает формироваться встречный сносящему поток, находится в пределах 10-20, а линейный рост  $h_v/D$  до значения примерно 1.25 наблюдается в области  $J \leq 400$ .

В 2016 году проведено моделирование ряда режимов синтеза диоксида титана, отличающихся одним из параметров, что позволило качественно и количественно оценить их влияние на газодинамическую структуру течения в реакторе, определяющую размер и фазовый состав синтезируемых частиц.



**Рис. 24. Схема рабочей зоны проточного реактора**

Расчеты проведены для следующих режимов работы установки: температура плазмообразующей струи  $T_1 = 2000$  К, температура струи реагентов  $T_2 = 490$  К, температура закалочной струи  $T_3 = 300$  К.

Варьировались состав плазмообразующей струи, струи реагентов и расход закалочной струи.

Режим №1.  $Q_1$  (Азот) = 1 г/с,  $Q_2$  (TiCl<sub>4</sub>) = 1.87 г/с,  $Q_3 = 12$  г/с.

Режим №2.  $Q_1$  (Азот) = 1 г/с,  $Q_2$  (TiCl<sub>4</sub>) = 1.87 г/с,  $Q_3 = 36$  г/с.

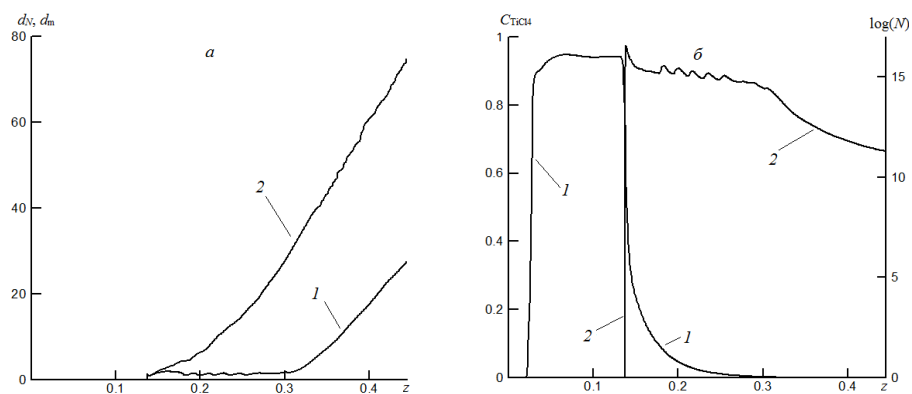
Режим №3.  $Q_1$  (Воздух) = 1 г/с,  $Q_2$  (TiCl<sub>4</sub>) = 1.87 г/с,  $Q_3 = 12$  г/с.

Режим №4.  $Q_1$  (Воздух) = 1 г/с,  $Q_2$  (TiCl<sub>4</sub>) = 1.87 г/с,  $Q_3 = 36$  г/с.

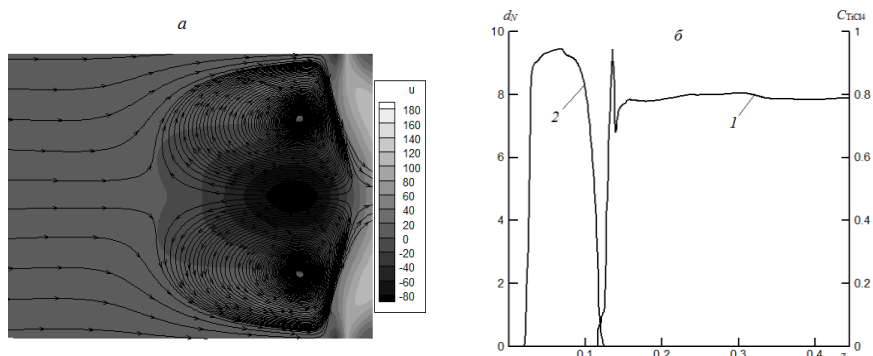
Режим №5.  $Q_1$  (Азот) = 1 г/с,  $Q_2$  (33% TiCl<sub>4</sub> и 67% O<sub>2</sub>) = 1.87 г/с,  $Q_3 = 12$  г/с.

Режим №6.  $Q_1$  (Азот) = 1 г/с,  $Q_2$  (33% TiCl<sub>4</sub> и 67% O<sub>2</sub>) = 1.87 г/с,  $Q_3 = 36$  г/с.

На рис. 25 и рис.26 представлены типичные распределения характеристик потока и параметров частиц (режимы №1 и №2).



**Рис. 25.** Для режима №1 распределение вдоль реактора: а) 1 – диаметр, средневзвешенный по числу частиц, 2 – диаметр, средневзвешенный по массе частиц; б) 1 – средняя по сечению массовая доля  $TiCl_4$ , 2 – логарифм средней по сечению плотности числа частиц.



**Рис. 26.** Для режима №2 структура потока и параметры смеси: а) линии тока и поле горизонтальной составляющей вектора скорости потока в окрестности вдува закалочной струи; б) распределение вдоль реактора: 1 – диаметр, средневзвешенный по числу частиц, 2 – средняя по сечению массовая доля  $TiCl_4$ .

Из рис. 25 видно, что причиной различия в размерах частиц  $d_N$  и  $d_m$  (кривые 1, 2 на рис. 23, а) являются проходящие на участке от  $z = 0.14$  до  $z \approx 0.3$  как процессы роста частиц за счет гетерогенной реакции и нуклеации, так и процесс образования новых частиц с диаметром  $d_0$ . Этим объясняется наличие участка почти постоянного значения  $d_N$  на кривой 1, рис. 25, а — рост размера уже существующих частиц компенсируется появлением новых. После того, как весь тетрахлорид титана прореагировал (кривая 1 на рис. 25, б) рост частиц определяется только коагуляцией (кривая 2 на рис. 25, б).

Режимы №1 и №2 отличаются только расходом закалочной струи:  $Q_3 = 12$  г/с и 36 г/с, соответственно. При этом происходит принципиальное изменение характера процесса.

Соотношение напоров сносящего потока и закалочных струй таково, что формируется противопоточная струя, см. рис. 26, *a*, и значительно сужается область, в которой происходит реакция (кривые 1, 2 на рис. 26, *б*). Кроме того, увеличение расхода закалочной струи приводит к росту скорости ниже по потоку. Для режима №1 средняя скорость в выходном сечении реактора 90 м/с, а для режима №2 — 123 м/с. Эти факторы приводят к тому, что значения  $d_N$  и  $d_m$  для режима №2 практически совпадают (поэтому распределение  $d_m$  на рисунке не приведено) и время, в течение которого происходит коагуляция, настолько мало, что рост частиц ниже зоны закалки практически не происходит. Некоторая немонотонность кривой 1 на рис. 26, *б* связана с наличием небольших пульсаций течения со встречной струей.

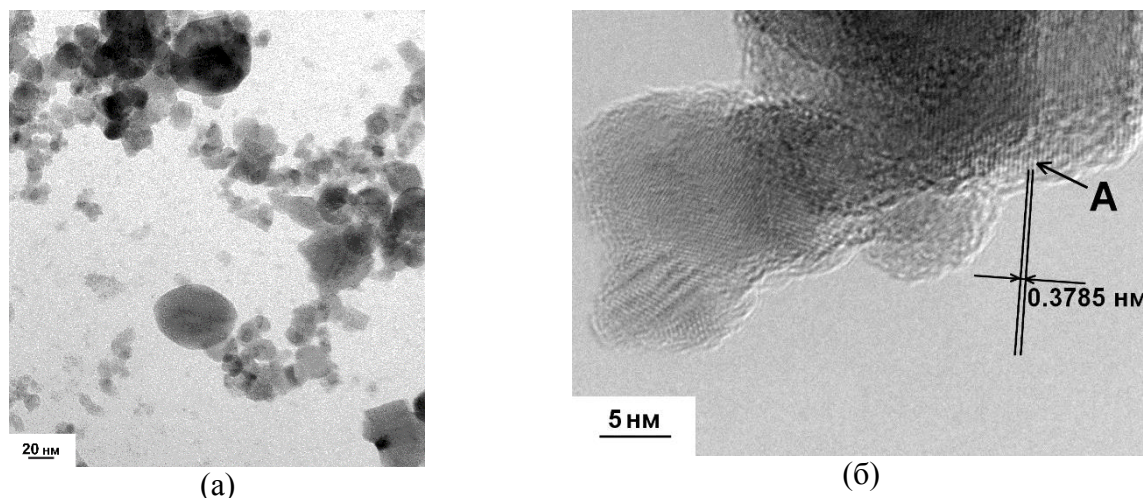
При использовании в качестве плазмообразующей струи воздуха описанные выше этапы образования и роста частиц, а также структура течения качественно сохраняются. Отличие состоит в том, что область реакции увеличивается, начинаясь в канале в окрестности вдува тетрахлорида титана, и процесс коагуляции приводит как к существенно большим размерам частиц на выходе из реактора, так и к их большей неоднородности. Для режима №3 среднemasсовый размер частиц 170 нм, для режима №4-70 нм.

Принципиальное отличие вариантов №5 и №6 заключается в том, что в этих вариантах фазовый состав (отношение рутильной фазы к анатазной) ~ 90/10. Тогда как для вариантов №1 – №4 это отношение находится в диапазоне 41/59 – 5/95. В этих вариантах структура течения такова, что формирование частиц в основном происходит в областях с большой конвективной производной температуры  $\sim 10^5$  и при быстрой закалке формируются решетки анатазной модификации.

Проведенное исследование позволило качественно и количественно оценить влияние ряда режимных параметров установки на газодинамическую структуру течения в реакторе, определяющую размер и фазовый состав синтезируемых частиц. Показано, что варьируя эти параметры можно получать порошки с требуемыми характеристиками (гранулометрический и фазовый состав) в широком диапазоне параметров.

На базе существующей плазмохимической лабораторной установки проведена серия экспериментов по плазмохимическому синтезу тонкодисперсного порошка диоксида титана, в частности, анатаза, в условиях, близких к режиму №1 моделирования с совмещением зоны реакции и зоны закалки. Здесь в нижней части реактора высокотемпературная смесь  $TiCl_4+N_2$  резко охлаждалась закалочным воздухом. Число закалочных струй  $n=8$ , диаметр отверстий инжекции струй  $d=3$  мм, диаметр канала  $D=32$

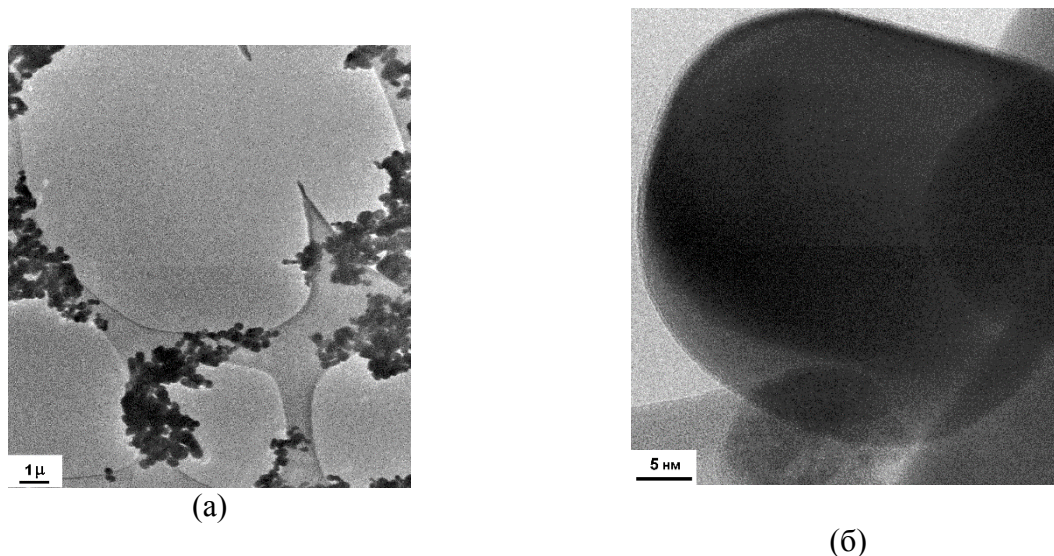
мм ( $d/D/n = 5/32/8$ ). При этом отношение напоров  $J \approx 39$ , глубина встречной закалки составила  $h_v/D \approx 0.8$ .



**Рис. 27 (а,б) – фото порошка диоксида титана (анатаз), полученные на ПЭМ высокого разрешения JEM-2200FS**

Конечный продукт, показанный на рис. 27, имеет следующие основные характеристики: содержание анатаза в порошке – 80-87 %, средний размер частиц порошка – 34-52 нм, площадь удельной поверхности порошка – 28-43 м<sup>2</sup>/г.

Проведены эксперименты по плазмохимическому синтезу тонкодисперсного порошка рутила при смешении реагентов в верхней части реактора, т.е. с разделением зоны реакции и зоны закалки, в условиях, аналогичным режимам моделирования №3 и 4 (конфигурация реактора  $d/D/n = 5/32/8$ ). Отношение напоров  $J \approx 19$ , глубина встречной закалки  $h_v/D \approx 0.5$ .

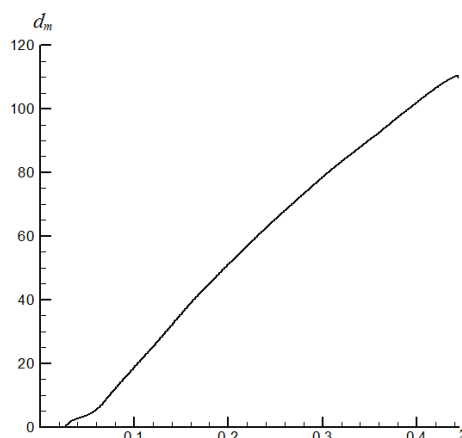


**Рис. 28 (а) – общий вид тонкодисперсного порошка диоксида титана, (б) – частица диоксида титана (рутил)**

Конечный продукт (рис. 28) имеет следующие основные характеристики: содержание рутила в порошке – около 99%, средний размер частиц порошка – 167 нм, площадь удельной поверхности порошка – 9 м<sup>2</sup>/г.

В целом, хотя и получило подтверждение предположение о зависимости основных характеристик порошка диоксида титана от глубины встречной закалки, остается неясным вклад такого фактора как совмещение зоны реакции и зоны закалки. В настоящее время проводится подготовка к проведению экспериментов по синтезу частиц диоксида титана с разделением зоны реакции и зоны закалки, когда варьируемым параметром остается только  $h_v/D$ .

Проверена работоспособность алгоритма моделирования процесса конверсии тетрахлорсилана SiCl<sub>4</sub> в частицы оксида кремния. На рис. 29 представлено распределение по длине реактора средневзвешенного по массе диаметра частиц SiO<sub>2</sub> синтезируемых в струе азотной плазмы. Состав смеси струй реагентов: N<sub>2</sub> – 68%, O<sub>2</sub> – 21%, SiCl<sub>4</sub> – 11%.



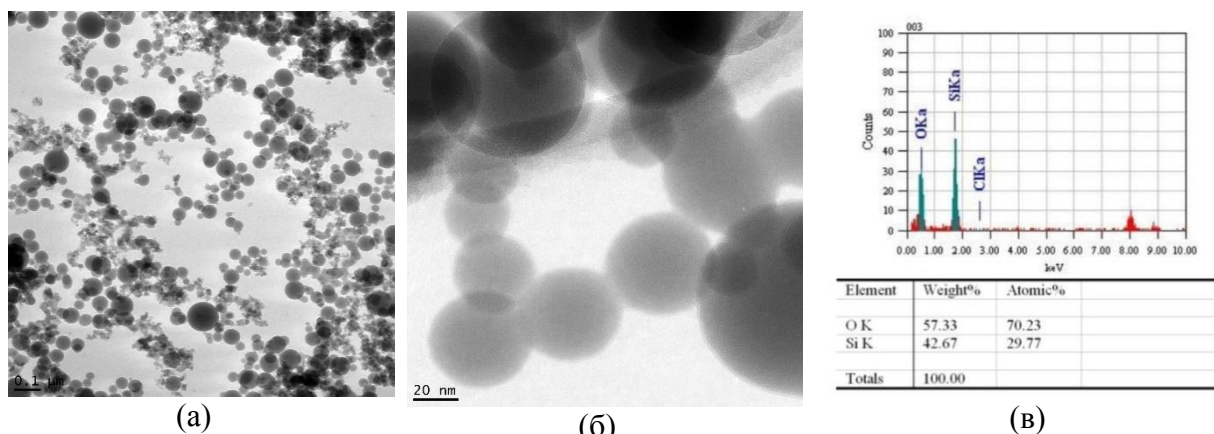
**Рис. 29 Диаметр, средневзвешенный по массе частиц**

Отличие от конверсии тетрахлорида титана состоит в том, что реакция происходит с очень высокой скоростью (константа скорости реакции  $\sim 10^{15}$  и при высокой температуре – температура плазмообразующей струи  $\sim 4000\text{K}$ ). Кроме того, значения ряда экспериментальных параметров в физико-химической модели существенно разнятся по данным из различных источников. Получены предварительные результаты, которые в дальнейшем можно использовать для верификации модели.

Проведены пробные эксперименты по плазмохимическому синтезу тонкодисперсного порошка диоксида кремния при предварительном смешении реагентов (SiCl<sub>4</sub> + кислород осушенного воздуха) до подачи в реактор по схеме разделения зоны реакции и зоны закалки (конфигурация реактора  $d/D/n = 3/32/8$ ). Отношение напоров струй и сносящего потока  $J \approx 51$ , глубина встречной закалки  $h_v/D \approx 0.6$ .



Конечный продукт, собранный с рукавного фильтра, имеет следующие основные характеристики: площадь удельной поверхности порошка — около  $100 \text{ м}^2/\text{г}$ , соответственно средний по удельной поверхности размер аморфных частиц порошка — 28 нм, доля загрязняющей примеси элементарного хлора — 0 масс. %. Результаты эксперимента и анализа образца порошка представлены на рис. 30.



**Рис. 30** (а) – общий вид тонкодисперсного порошка диоксида кремния, (б) – агломераты частиц диоксида кремния; (в) – результаты анализа образца порошка на элементный состав

Из рис. 30, б видно, в частицах отсутствуют характерные линии плоскостей кристаллической решетки, что указывает на то, что полученный порошок оксида кремния представляет собой агломераты аморфных частиц, что типично для условий плазмохимического синтеза. В ближайшее время будут проведены эксперименты по синтезу частиц оксида кремния с меньшей глубиной встречной закалки и без нее, хотя результаты моделирования в отсутствие закалки (рис. 30, в) уже показывают укрупнение частиц до размеров, превышающих 100 нм.

**Выводы:** Разработан метод управления синтезом диоксида титана анатазной модификации в условиях встречной закалки. Формирование частиц ультрадисперсных размеров происходит при совмещении зон реакции и встречной закалки с большими значениями конвективной производной температуры ( $\sim 10^5 \text{ К/с}$ ). Среднемассовый размер частиц составил: в расчетах  $\sim 20\text{-}70 \text{ нм}$ ; в экспериментах  $\sim 32\text{-}45 \text{ нм}$ . Содержание анатаза в порошке: в расчетах - 71%; в экспериментах - 83%. Предложенный способ позволяет управлять фазовым составом синтезируемого диоксида титана, применяемого в качестве фотокатализаторов, а также для очистки и нейтрализации вредных веществ в воде и воздухе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения темы проекта *«Моделирование, экспериментальные исследования и диагностика физико-химических процессов в лазерных и плазменно-дуговых технологиях обработки материалов, техногенного и природного сырья»* в период 2013-2016 гг. были получены следующие (основные) результаты.

**По блоку 1:** На основе лабораторных, экспериментальных и численных исследований сформулированы и обобщены новые представления о механизмах образования шероховатости, которые, при лазерной резке толстолистовых металлов, напрямую связаны с характеристиками лазерного излучения, динамикой технологического газа и удалением расплава [1] (<http://itam.nsc.ru/upload/medialibrary/700/booklasercuttingkovalev.pdf>).

Реализована комбинированная, на базе спектрометра и трехцветового пирометра, методика лазерно-оптической регистрации скорости и температуры частиц порошка в двухфазном потоке, создаваемом коаксиальным соплом при лазерной наплавке. Теоретически и экспериментально показано, что при лазерной наплавке в световом поле лазера частицы порошка приобретают дополнительное ускорение за счет лазерного испарения и появления реактивной силы, обусловленной давлением отдачи паров с облученной части поверхности частиц [10].

Предложена новая методика расчета свободно насыпанной упаковки порошка с частицами сферической формы, которая позволяет с учетом силы веса и адгезии получать близкую к реальной, внутреннюю структуру насыпного слоя порошка с целью дальнейшего моделирования процессов селективного лазерного плавления и спекания [11].

Построена самосогласованная модель объемной лазерной наплавки, объединяющая транспорт, нагрев порошка, образование наращиваемого валика и процессы теплопереноса в ванне расплава, остывание и кристаллизацию [12]. Разработаны физико-математические трехмерные модели расчета конвекции мелкодисперсных тугоплавких компонентов в ванне расплава при лазерном упрочнении и легировании [13].

На основе уравнений Максвелла сформулированы постановки ряда задач о распространении и поглощении лазерного излучения при обработке металлов (резке, сварке, спекании порошков). Впервые исследованы проявления волновых свойств излучения при решении задач лазерного взаимодействия с металлами и диэлектриками, а также объектами, линейные размеры которых сопоставимы с длиной волны излучения [14].

Построена дискретная модель процессов тепло- и массопереноса в зернистом слое частиц металла при воздействии на него сканирующего лазерного излучения [15].



На этапе 2016 года были получены расчетно-экспериментальные данные, объясняющие существующие ограничения по качеству лазерной резки металлов волоконными лазерами, имеющими длину волны в 1,07 мкм. В частности, в результате скоростной визуализации процесса показано, что при резке нержавеющей стали с инертным газом на расплав оказывает значительное воздействие термокапиллярная сила, перенаправляющая течение расплава от фронта реза на боковые стенки. Особенностью коротковолнового излучения (1,07 мкм) в этом процессе является высокое поглощение боковыми стенками отраженного от фронта реза излучения. В численном расчете поглощаемая на боковых стенках реза плотность мощности сопоставима с плотностью мощности, поглощенной на фронте реза. Нагрев боковых стенок приводит к уменьшению поверхностного натяжения и угла смачивания твердого металла с его же расплавом, и как следствие, к растеканию струи расплава и ухудшению качества реза. Дополнительно исследованы газодинамические механизмы отрыва газового потока в канале лазерного реза. Впервые рассчитана скорость обобщенной реакции окисления металла и картина течения кислорода с учетом его массового потребления на фронте реза для случая кислородной газолазерной резки малоуглеродистой стали. Показано влияние давления и чистоты кислорода на скорость обобщенной реакции и структуру зоны термического влияния. Определены пределы допустимой величины загрязнения кислорода (в %), для качественной лазерной резки стали.

Создана установка и проведены эксперименты по визуализации потока порошка, создаваемого сопловыми насадками при лазерной наплавке. Полученные данные были использованы для верификации результатов численного моделирования. Впервые показана определяющая роль закона отражения частиц от стенок транспортного канала сопла на профиль и фокусировку порошковой струи на подложке. Разработанные модели и установка по визуализации могут быть использованы для оптимизации режимов лазерной наплавки и легирования, а также для проектирования новых сопловых насадок.

**По блоку 2.** В ходе выполнения проекта плазмотрон ПНК-50 разработки ИТПМ СО РАН был доукомплектован узлом кольцевого ввода порошка в плазменную струю [16]. Уникальная особенность этого узла заключается в практически полном отсутствии смещения транспортирующего и фокусирующего газов с основным высокоэнтальпийным потоком плазмообразующего газа. В тоже время поток частиц порошка полностью проходит в высокотемпературное ядро струи, где частицы полностью расплавляются, приобретают высокую скорость и при ударе с подложкой формируют плотные покрытия с высокими эксплуатационными свойствами. В результате был разработан и создан промышленный вариант плазменного оборудования «ТЕРМОПЛАЗМА 50–01»

(<http://плазменноенапылениепорошков.рф>) для напыления и наплавки дисперсных материалов, и получения покрытий и цельных изделий с уникальными свойствами. Высокая температура воздушной плазмы, 6800К, при нанесении керамики и 4500К при нанесении металлических материалов совместно с узлом кольцевого ввода порошка позволяют наносить покрытия из всего спектра современных порошковых материалов, оксидных и карбидных керамик, различных, в том числе тугоплавких металлов [17-19].

Были получены и исследованы покрытия из оксида алюминия с рекордно низкой пористостью, около 1%. Отрабатывалась технология создания корковых плазменно-порошковых изделий из тугоплавкого молибдена. Получены толстые, толщиной несколько миллиметров, слои износостойких самофлюсующихся покрытий системы Ni-Cr-B-Si-C с высокими механическими свойствами и стойкостью к ударам. Отработана технология нанесения интерметаллидных никель-алюминиевых покрытий [20]. Проводились исследования по плазменной порошковой наплавке толстых функциональных слоев.

Уровень работ соответствует мировому уровню, и частично превосходит его, а именно получены керамические покрытия с пористостью около 1%, отработана технология получения корковых плазموкерамических изделий.

Результатом этапа 2016 года является исследование структуры и трибологических свойств жаростойких интерметаллидных покрытий из никелевого сплава, порошок ПР - НХ16СР3 (Ni – основа; С – 0,75%; Cr – 16%; Si – 3,2%; В – 2,7%), полученных воздушно-плазменным напылением. Получена субмикроструктурная структура покрытий со средним размером зерен 80 нм. Износостойкость на 70% выше износостойкости образцов из стали 20 после цементации. Пористость на оптимальном режиме напыления составляет 0,96%, что не превышает пористость таких высокоскоростных методов как High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) и детонационное напыление.

**По блоку 3.** Разработаны серии технологических плазмотронов, работающих с выносной дугой и в струйном режиме с ресурсом работы более 1000 часов в нейтральных, окислительных и химически активных газах.

([http://www.lan/upload/medialibrary/640/itpm\\_elektrodugovye.jpg](http://www.lan/upload/medialibrary/640/itpm_elektrodugovye.jpg))

В ходе работ над созданием плазмотронов с восстанавливаемым в процессе эксплуатации графитовым катодом созданы экспериментальные установки, на которых определены термодинамические условия осаждения структурированных углеродных покрытий. Определены предельные скорости роста, при которых покрытия остаются плотными. Впервые показано, что плотные покрытия с высокой степенью графитизации осаждаются из газовой смеси с температурой от 3500 К и выше, что связано с

образованием паров углерода и низкомолекулярных нитридов углерода. При более низких температурах образуются аморфные сажеобразные осаднения. Такая ситуация непохожа на то, что происходит в общеизвестных способах формирования слоев пироуглерода при низкотемпературном осаждении, где строительным материалом покрытия являются ароматические молекулы. Получено, что покрытие перестает быть плотным при скорости осаждения более 0.15 мм/мин, скорость осаждения пропорциональна тепло-массообмену с поверхностью. На данный момент ведется проектирование плазмотрона с таким методом восстановления электродов.

Спроектирован и изготовлен плазмотрон высокой мощности (до 5 МВт) с большим давлением рабочего газа (до 5 МПа). Была предложена уникальная схема плазмотрона с межэлектродными вставками, где плазмообразующий газ подается через лабиринтный канал, охлаждая стенки канала плазмотрона и параллельно нагреваясь. Таким образом, удалось сократить радиационные потери в стенки канала, которые приводили к радикальному снижению КПД системы. Планируется сохранить КПД плазмотрона на уровне 70-80% при давлениях плазмообразующего газа до 5 МПа. Плазмотрон планируется использовать для испытания материалов, узлов и конструкций аэрокосмического назначения.

На основе открытого исходного кода разработано программное обеспечение для трехмерного расчета плавильных плазменнодоговых камер и исследования режимов осаждения примесей металлов в плазмотермическом реакторе [21]. На этапе 2016 года проведено численное моделирование турбулентных течений многокомпонентного расплава в реакторе при воздействии на расплав плазменной токовой струи. Впервые получена и описана характерная структура течения расплава, распределение температуры и скорости в реакторах подобного типа. Проведены численные расчеты осаждения частиц в плавильной камере для нескольких режимов течения и определены параметры, определяющие эффективность выделения полезного сырья.

Теоретически и экспериментально на базе существующей лабораторной установки реализован способ плазмохимического синтеза в неравновесных условиях тонкодисперсного порошка диоксида титана ( $TiO_2$ ) анатазной кристаллической модификации, при совмещении зон реакции и встречной закалки [22, 23].

Путем сравнения результатов математического моделирования и экспериментов показана адекватность используемой физико-химической и математической моделей реальному процессу конверсии, происходящему в реакторе, включающему газофазную реакцию тетрахлорида титана и кислорода в канале плазмохимического реактора и последующее охлаждение продуктов реакции в закалочном узле [24]. Формирование

частиц ультрадисперсных размеров происходит в областях с большими значениями конвективной производной температуры ( $\sim 10^5$  К/с). Среднемассовый размер частиц составил: в расчетах  $\sim 20-70$  нм; в экспериментах  $\sim 32-45$  нм. Содержание анатаза в порошке: в расчетах - 71%; в экспериментах – 83%. Предложенный способ позволяет управлять фазовым составом синтезируемого порошка диоксида титана, применяемого в солнечных батареях и оптоволоконных резонаторах, а также в качестве фотокатализаторов, в частности, при очистке сточных вод от органических отходов и воздуха от вредных примесей.

#### **Список использованных источников**

1. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. М.: Физматлит, 2013.
2. Глуш Г.Г., Смуров И.Ю. Физические основы лазерной обработки материалов, Физматлит, 2016
3. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Серия: Низкотемпературная плазма, том 17. Новосибирск: Наука, 1999.
4. Houben J.M., Zaat J.H. Investigations into the mechanism of exothermically reacting nickel-aluminium spraying materials // Proc. Seventh International Metal Spray Conference (London), Sept 1973, Welding Institute, P. 77-88.
5. Шевцова Л.И. Структура и механические свойства материалов на основе алюминидов никеля, полученных по технологии искрового плазменного спекания порошковых смесей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2015.
6. Косицын С.В. Фазовые и структурные превращения в сплавах на основе моноалюминидов никеля // Успехи физики металлов. 2008. Т. 9. С. 195–258.
7. Marschall J. et al. Temperature Jump Phenomenon During Plasmatron Testing of ZrB<sub>2</sub>-SiC Ultrahigh-Temperature Ceramics // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2012. Т. 26. №. 4. С. 559-572.
8. Анфимов Н. А. и др. Электродуговые газодинамические установки ЦНИИмаша, схемы и методики испытаний // Космонавтика и ракетостроение. 1994. №. 2. С. 33-46.

9. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыпкин И.М. и др. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск: Наука, 1981.
10. Kovaleva I.O., Kovalev O.B., Zaitsev A.V., Sergachev D.V. Modeling and numerical study of light-propulsion phenomena of particles acceleration in coaxial laser powder cladding // *Physics Procedia* 56 ( 2014 ) 439 – 449.
11. Ковалев О.Б., Ковалева И.О. Моделирование случайной упаковки насыпного слоя полидисперсных сферических частиц// *ПМТФ*. 2014. Т. 55, №4. С. 184-192.
12. Bedenko D.V., Kovalev O.B., Smurov I., Zaitsev A.V. Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology//*International Journal of Heat and Mass Transfer* 95 (2016) 902–912.
13. Kovalev O.B., Gurin A.M. Multivortex convection of metal in molten pool with dispersed impurity induced by laser radiation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 68 (2014), 269–277.
14. Kovalev O.B. and Galjov R.V. /The application of Maxwell’s equations for numerical simulation of processes during laser treatment of materials// *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48, 2015. doi:10.1088/0022-3727/48/30/305501.
15. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий // *Известия РАН. Сер. Физическая*. Т.80. 2016. №4. С.408-413.
16. Grigor’ev S. N., Kovalev O. B., Kuzmin V. I., Mikhal’chenko A. A., Rudenskaya N. A., N. G. Sokolova, and V. M. Fomin New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings// *Journal of Friction and Wear*, 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 161–165.
17. А.А. Михальченко, В.И. Кузьмин, Д.В. Сергачев, Е.В. Картаев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. Исследования динамики нагрева и ускорения частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в осесимметричном гетерогенном потоке плазмотрона с межэлектродными вставками (МЭВ)// *Теплофизика и аэромеханика*, 2014, т.21, №4, с.537-549.
18. Yu.P. Tarasenko, I.N. Tsareva, O.B. Berdnik, Ya.A. Fel, V.I. Kuzmin, A.A. Mikhalchenko, E.V. Kartaev. The structure and physical-mechanical properties of heat-resistant Ni-Co-Cr-Al-Y intermetallic coating obtained using rebuilt plasma equipment// *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, Vol. 21, No. 5, p.671-680

19. Кузьмин В.И., Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А. Теплозащитные покрытия диоксида циркония, полученные методом высокоэнергетического плазменного напыления, для деталей горячего тракта гтд // Проблемы машиностроения и надежности машин № 4, 2015, с. 89 – 95.
20. Корниенко Е.Е., Никулина А.А., Баннов А.Г., Кузьмин В.И., Мильдебрах М., Безрукова В.А., Жойдик А.А. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля. Обработка металлов, № 4 (73) 2016, с. 52 – 63.
21. Ващенко С.П., Гурин А.М., Зайцев А.В., Ковалев О.Б. Моделирование течения в плавильной камере плазмотермической установки по переработке металлосодержащих отходов// Доклады VI Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине./Новосибирск: Параллель, 2015, с. 39-43.
22. E.V. Kartaev, V.A. Emelkin, M.G. Ktalkherman, S.M. Aulchenko, S.P. Vashenko, V.I. Kuzmin. Formation of counter flow jet resulting from impingement of multiple jets radially injected in a crossflow// Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, Vol.68, p.310-321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.05.009>.
23. Е.В. Картаев, В.П. Лукашов, С.П. Ващенко, С.М. Аульченко, О.Б. Ковалев, Д.В. Сергачев. Плазмохимический синтез тонкодисперсного порошка диоксида титана хлоридным методом// Физика и химия обработки материалов. 2015, №6, с.62-72.
24. Картаев Е.В., Емелькин В.А., Аульченко С.М., Кталхерман М.Г. Расчетно-экспериментальное исследование развитого встречного течения образованного в результате взаимодействия сталкивающихся струй со сносящим потоком в цилиндрическом канале//Труды НГАСУ. 2016. Т19. №1(61), С.40-50.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Перечень статей, опубликованных по теме проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием

#### *Статьи в рецензируемых журналах*

1. Картаев Е.В., Емелькин В.А., Аульченко С.М., Кталхерман М.Г. Расчетно-экспериментальное исследование развитого встречного течения образованного в результате взаимодействия сталкивающихся струй со сносящим потоком в цилиндрическом канале//Труды НГАСУ. 2016. Т. 19. №1(61), с.40-50.
2. Аульченко С.М., Замураев В.П., Калинина А.П. Воздействие приповерхностных энергетических импульсов на ударно-волновую структуру транс- и сверхзвукового потока //Тепловые процессы в технике 2016. Т.8. № 2, С. 64 – 74.
3. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Сеницын В.А., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В., Ващенко С.П., Кузьмин В.И. Плазменная обработка древесины. Теплофизика и аэромеханика, 2016, т.23, №1, с. 125 – 130.
4. Токарев А.О., Кузьмин В.И., Малыгина Я.К.. Повышение качества металлического порошкового покрытия при плазменном напылении с кольцевой инжекцией порошка. Журнал «Актуальные проблемы в машиностроении», 2016, №3, с. 370-377.
5. Шеховцов В. В., Волокитин О. Г., Кузьмин В.И. Численное исследование плавления частицы кварца в силикатном расплаве без учета фазовых переходов. Журнал «Бюллетень науки и практики», 2016, №5, С. 87-90.
6. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий //Известия РАН. Сер. Физическая. Т.80. 2016. №4. С.408-413.
7. Bedenko D.V., Kovalev O.B., Smurov I., Zaitsev A.V. Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology//International Journal of Heat and Mass Transfer 95 (2016) 902–912.
8. Корниенко Е.Е., Муль Д.О., Рубцов О.А., Ващенко С.П., Кузьмин В.И., Сергачёв Д.В. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий из Ni3Al. Теплофизика и аэромеханика. Т. 23 (2016), №6. С. 957-966.
9. Волокитин О.Г., Шеремет М.А., Шеховцов В.В., Бондарева Н.С., Кузьмин В.И. Исследование режимов конвективного теплопереноса при получении высокотемпературных силикатных расплавов. Теплофизика и аэромеханика. Т. 23 (2016), №5. С. 789-800.
10. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Кузьмин В.И. Численное исследование плавления частицы кварца в силикатном расплаве без учета фазовых переходов // Бюллетень науки и практики. –2016. –No. 5 (6). –С. 87-90.

11. Корниенко Е.Е., Никулина А.А., Баннов А.Г., Кузьмин В.И., Мильдебрах М., Безрукова В.А., Жойдик А.А. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. - 2016. -Т.4 (73). -С. 52-62. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62.

### *Доклады на конференциях*

1. Аульченко С.М., Картаев Е.В. Использование противоточной струи для управления фазовым составом частиц диоксида титана, синтезируемых в проточном плазмохимическом реакторе // *Материалы XI Международная конференция по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016)*. 25-31 мая 2016г. Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2016.- 600 л. С. 174-175.
2. Звегинцев В.И., Аульченко С.М., Лукашевич С.В., Наливайченко Д.Г. Методика расчетно-экспериментальных исследований характеристик горения твердых топлив в высокоскоростном потоке воздуха//*Тезисы XII Международной конференции NEMs–2016 Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение*. Томск, Россия, 7-9 сентября 2016, С.49-50.
3. С.М. Аульченко, Е.В. Картаев. Моделирование управления синтезом субмикронных частиц диоксида титана // *13 Всероссийская конференция «Краевые задачи и математическое моделирование»: тематич. сб. науч. ст. / НФИ «КемГУ»; под общ. Ред. Е.А. Вячкиной, В.О. Каледина.– Новокузнецк, 2016. – С.*
4. M.G. Ktalkherman, E.V. Kartaev, V.A. Emelkin. Study of multiple impinging jets with a confined crossflow// *18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-2016)*, Perm, Russia, June 27 – July 3, 2016: Abstracts. Pt.1. p.134-135.

### *Патенты*

1. Швейкин Г.П., Руденская Н.А., Фролов В.Я., Руденская М.В., Кузьмин В.И. Способ нанесения износостойкого покрытия. Патент РФ № 2578872. 01.03.2016 г.
2. Швейкин Г.П., Руденская Н.А., Кузьмин В.И., Сергачёв Д.В., Соколова Н.В. Способ нанесения износостойкого покрытия на стальные детали. Патент РФ № 2594998. 29.07.2016 г.



**Наукометрические показатели в целом по проекту за период 2013-2016 гг.**

индикатор	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	58	15	20	12	11
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	24	9	11	3	1
Число тезисов в конференциях	53	14	17	18	4
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России зарегистрированных патентов за рубежом	6	2	1	1	2

Копии планов НИР по теме проекта, 2013-2016 гг.

<p><b>Копия планов НИР 2013 года</b></p>				<p>Область применения: Энергоэффективность и энергосбережение, включая вопросы разработки новых видов топлива. Организации: ГК "Ростехнологии", ОАО «Газпром», ОАО «Российские железные дороги», ОАО ТМКБ «Союз», ФГУП «Российский научный центр Прикладной химии»</p>
<p><b>Приоритетное направление III.18. Программа III.18.1. Проект III.18.1.3.</b> «Моделирование, экспериментальные исследования и диагностика физико-химических процессов в лазерных и плазменно-дуговых технологиях обработки материалов, техногенного и природного сырья». Руководитель проекта: д.ф.-м.н. О.Б. Ковалев.</p>	<p>Блок 1: Провести численное моделирование в трехмерной постановке процесса лазерной резки металлов, с учетом оттока тепла в боковые стенки реза для различной длины волны лазерного излучения: 1.06 и 10.6 мкм.  Провести визуализацию процессов сопровождающих лазерную резку типовых материалов с нейтральным газом с длиной волны излучения 1.06 мкм.  Провести трехмерное численное моделирование многовихревой конвекции расплава металла с дисперсными примесями под воздействием лазерного излучения.  Блок 2: Провести лазерно-оптическую диагностику процессов нагрева, плавления и ускорения частиц порошка в потоке термической плазмы при кольцевом вводе частиц с газодинамической фокусировкой.  Провести оптимизацию конструкции узла кольцевого ввода порошковых материалов.</p>	<p>Будет проведено моделирование формы реза при параметрах излучения близких к реальным для различных типов лазеров (CO<sub>2</sub> и волоконного). Будет проведен анализ отличий и причин, из-за которых резко ухудшаются качество резки волоконным лазером при толщине материала более 6 мм. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м.н. А.В. Зайцев.  Будут получены видеоматериалы по визуализации процесса лазерной резки с нейтральным газом. Это позволит сравнить ранее полученные теоретические результаты с дополнительными экспериментальными данными по визуализации. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м.н. Г.В. Ермолаев, к.ф.-м.н. А.В. Зайцев.  Будут получены данные о распределении тугоплавких частиц в переплавленной зоне после остывания при лазерно-порошковым модифицировании и легировании поверхности металлов. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», д.ф.-м.н. О.Б. Ковалев, асп. А.М. Гурин.  Будут получены данные о параметрах частиц, проведено комплексное исследование и оптимизация процесса напыления металлических и керамических покрытий при аксиальном вводе порошка в поток термической плазмы. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.т.н. А.А. Михальченко, асп. Д.В. Сергачев.</p>	<p>6507,672</p>	<p>Будут определены оптимальные геометрические параметры плазменного канала, в том числе дистанция от точки фокусировки газопорошкового потока до среза сопла (узла кольцевого ввода). Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.т.н. А.А. Михальченко, асп. Д.В. Сергачев.</p>

	<p>Провести исследования свойств металлических и керамических покрытий, полученных плазменным напылением с использованием узла кольцевого ввода.</p> <p>Блок3: Создать экспериментальную установку для проведения исследований условий образования углеродных пленок в цилиндрическом катоде при горении дуги в среде углеводородных газов. Разработать модель осаждения углеродной пленки на поверхности цилиндрического катода.</p> <p>Провести численное моделирование турбулентных течений расплава металла в плазмотермическом реакторе при воздействии на расплав плазменной токовой струи.</p> <p>Провести модернизацию экспериментальной установки и программ математического моделирования для исследования особенностей (режимов управления и условий) образования микро- и наноразмерных частиц диоксида титана в реакторе проточного типа со струйным плазмотроном. Разработать проточный реактор с плазмотроном V-типа для проведения исследований процессов получения порошка диоксида титана и конверсии тетрафторметана.</p>	<p>Будут представлены результаты исследования микроструктуры металлических и керамических покрытий, полученных воздушно-плазменным напылением, что позволит связать режимные параметры напыления с ожидаемыми характеристиками и свойствами покрытий. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.т.н. А.А. Михальченко, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будет разработана лабораторная установка для исследований образования углеродных пленок путем осаждения из газообразных углеводородов в плазмотермическом реакторе. Будет разработана физико-химическая математическая модель образования и роста пленок. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.П. Лукашов, к.х.н. В.А. Емелькин, к.ф.-м.н. Г.В. Ермолаев.</p> <p>Будут представлены результаты численного моделирования турбулентных течений расплава металла в плавильной камере, которые позволят провести анализ тепло- и массообменных процессов в плазмотермическом реакторе и рассчитать тепловые потери. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.м.н. А.В. Зайцев, н.с. С.П. Вашенко, асп. А.М. Гурин.</p> <p>Будет рассчитан фазовый состав порошка TiO<sub>2</sub> по процентному содержанию кристаллических (рутильной и анатазной) фаз, а также рассчитано изменение по длине реактора фракционного состава образующихся твердых частиц. Будут произведены модернизация узлов инжекции TiCl<sub>4</sub> и закалки в реакторе с целью повышения выхода конечного продукта – порошка TiO<sub>2</sub>, а также сборка и монтаж установки по конверсии тетрафторметана. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», д.ф.-м.н. С.М. Аульченко, к.т.н. В.П. Лукашов, к.х.н. В.А. Емелькин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев.</p>	
--	--	--	--

<p><b>Копия планов НИР 2014 года</b></p>	<p><b>Приоритетное направление III.18. Программа III.18.1</b></p> <p><b>Проект III.18.1.3.</b></p> <p>«Моделирование, экспериментальные исследования и диагностика физико-химических процессов в лазерных и плазменно-дуговых технологиях обработки материалов, техногенного и природного сырья».</p> <p>Руководитель проекта: д.ф.-м.н. О.Б. Ковалев.</p>	<p><b>Блок 1:</b></p> <p><b>2014 г.</b></p> <p>Провести численное моделирование течений кислорода, содержащего примеси, внутри лазерного реза и анализ процессов формирования, движения и удаления пленки расплава, и их влияние на образование шероховатости.</p> <p>Провести моделирование течений в ванне расплава в процессе лазерно-порошковой наплавки с учетом криволинейной свободной поверхности расплава, изменяющейся под действием силы поверхностного натяжения и силы тяжести.</p> <p>Провести визуализацию газодисперсной струи и регистрацию параметров частиц при транспортировке порошка к подложке в условиях лазерно-порошковой наплавки.</p>	<p>Будет проведено моделирование течений кислорода внутри лазерного реза. Будет проведен анализ процессов формирования, движения и удаления пленки расплава, и их влияние на образование шероховатости.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м.н. Г.В. Ермолаев, к.ф.-м.н. А.В. Зайцев.</p> <p>Будет проведено моделирование течений в ванне расплава в процессе лазерно-порошковой наплавки с учетом криволинейной свободной поверхности расплава, изменяющейся под действием силы поверхностного натяжения и силы тяжести.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», м.н.с. Д.В. Беденко, м.н.с. А.М. Турин</p> <p>Будет подготовлена установка для визуализации процесса лазерно-порошковой наплавки и предоставлены результаты экспериментальных исследований.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м.н. А.В. Зайцев, асп. Д.В. Сергачев.</p>	<p>Область применения:</p> <p>Энергоэффективность и энергосбережение, включая вопросы разработки новых видов топлива.</p> <p>Организации:</p> <p>ГК "Ростехнологии", ОАО «Газпром», ОАО «Российские железные дороги», ОАО ТМКБ «Союз», ФГУП «Российский научный центр Прикладной химии»</p>
<p><b>Блок 2:</b></p> <p><b>2014 г.</b></p> <p>Технически оценить возможность получения изделий из порошка молибдена плазменным прототипированием.</p> <p>Выбрать антиадгезионный слой для сплошных изделий из молибдена при плазменном прототипировании.</p> <p>Определить необходимые технологические приёмы для снятия (релаксации) внутренних напряжений при плазменном</p>	<p>Будет проведена оценка возможности получения изделий из порошка молибдена плазменным прототипированием.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будет выбран антиадгезионный слой для сплошных изделий из молибдена, получаемых плазменным прототипированием.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p>	<p>Будет проведена оценка возможности получения изделий из порошка молибдена плазменным прототипированием.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будет выбран антиадгезионный слой для сплошных изделий из молибдена, получаемых плазменным прототипированием.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p>		



	<p>прототипировании изделий из порошка молибдена.</p> <p>Выбрать оптимальные режимы напыления и дополнительные технологические приёмы, обеспечивающие необходимое качество изделий из молибдена.</p>		<p>Будут определены необходимые технологические приёмы для снятия внутренних напряжений при плазменном прототипировании изделий из порошка молибдена.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будут выбраны режимы напыления и дополнительные технологические приёмы, обеспечивающие необходимое качество изделий из молибдена.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p>	
	<p><b>Блок 3:</b> <b>2014 г.</b></p> <p>Исследовать условия роста пленок углерода в цилиндрическом катоде в зависимости от газодинамики течения в нем и параметров дугового разряда.</p> <p>Провести численные исследования течения расплава в плазмохимической камере плавления при воздействии на расплав плазменной токовой струи воздуха.</p> <p>Экспериментально исследовать образование фаз диоксида титана при совмещении зоны химической реакции и зоны закалки.</p> <p>Провести численное моделирование образования различных фаз диоксида титана в зависимости от параметров потока.</p>		<p>Будут исследованы условия роста пленок углерода в цилиндрическом катоде в зависимости от газодинамики течения в нем и параметров дугового разряда. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м. Г.В. Ермолаев, к.ф.м.н. А.В. Зайцев, н.с. С.П. Ващенко.</p> <p>Будет проведено численное моделирование течения расплава в плазмохимической камере плавления при воздействии на расплав плазменной токовой струи воздуха. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.м.н. А.В. Зайцев, м.н.с. А.М. Гурин, н.с. С.П. Ващенко</p> <p>Будут определены рабочие параметры установки, при которых происходит плазмохимический синтез фотокаталитически активного диоксида титана анатазной (80-90%) кристаллической модификации (размер частиц менее 30 нм).</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», д.ф.м.н. С.М. Аульченко, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев.</p>	

<p><b>Копия планов НИР 2015 года.</b></p>			
<p><b>Приоритетное направление III.18. Программа III.18.1. Проект III.18.1.3.</b> «Моделирование, экспериментальные исследования и диагностика физико-химических процессов в лазерных и плазменно-дуговых технологиях обработки материалов, техногенного и природного сырья». Руководитель проекта: д.ф.-м.н. О.Б. Ковалев.</p>	<p>Блок 1: 1.1. Разработать физико-математические модели распространения электромагнитного излучения в узких каналах и кавернах, образующихся при лазерной обработке материалов. 1.2. Разработать модели формирования одиночного валика и наращиваемого металлообъекта в процессе коаксиальной лазерно-порошковой наплавки. 1.3. Построение моделей процессов сопровождающих взаимодействие лазерного излучения с насыщенным слоем порошка в аддитивных технологиях селективного лазерного плавления и спекания.</p> <p>Блок 2: 2.1. Провести оптимизацию конструкции двухдугового плазмотрона для плазменной наплавки порошковых материалов. 2.2. Провести экспериментальные исследования по определению оптимальных соотношений между пилотным и рабочим дугowymi разрядами наплавочного плазмотрона.</p>	<p>Будут разработаны физико-математические модели распространения и многократного переотражения лазерного излучения в узких каналах подобных лазерному резу в металле. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м.н., с.н.с. Зайцев А.В., к.ф.-м.н., с.н.с. Ермолаев Г.В.</p> <p>Будут рассчитаны тепловые состояния одиночного валика и наращиваемого металлообъекта в целом, профили поверхности и размеры зоны проплавления основы. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», м.н.с. Беденко Д.В., м.н.с. Гурин А.М.</p> <p>Будут построены дискретные модели процессов тепло- и массопереноса в зернистом слое частиц металла при воздействии на него сканирующего лазерного излучения. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», д.ф.-м.н., О.Б. Ковалев.</p>	<p>Область применения: Энергоэффективность и энергосбережение, включая вопросы разработки новых видов топлива.</p> <p>Организации: ГК "Ростехнологии", ОАО «Газпром», ОАО «Российские железные дороги», ОАО ТМКБ «Союз», ФГУП «Российский научный центр Прикладной химии»</p>
		<p>Будет оптимизирована конструкция и создан промышленный вариант двухдугового плазмотрона (пилотный и рабочий дуговые разряды) для плазменной наплавки порошковых материалов. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н., с.н.с. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н., с.н.с. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будут определены оптимальные соотношения пилотного и рабочего дуговых разрядов, которые позволят минимизировать перемешивание наплавляемого материала с материалом основы при гарантированном образовании металлургической связи покрытия с основой. Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будет отработана технология воздушно-плазменного напыления</p>	

	<p>2.3. Провести исследования структуры и свойств покрытий из самодлюсающихся порошков на основе никеля, полученных высокоскоростным воздушно-плазменным напылением.</p> <p>2.4. Провести эксперименты и оценить условия воздушно-плазменного напыления покрытий большой толщины (&gt; 1 мм) из твердых порошковых материалов (HRc не менее 50 ед).</p>	<p>высококачественных покрытий на никелевой основе, обладающих низкой пористостью, высокой износостойкостью, твердостью и адгезией.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p> <p>Будет проведена оценка условий получения воздушно-плазменным напылением порошковых материалов твердых, износостойких покрытий большой толщины (стойких к работе в жестких условиях при ударных нагрузках).</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.т.н. В.И. Кузьмин, к.ф.-м.н. Е.В. Картаев, асп. Д.В. Сергачев.</p>	
<p>Блок 3: <b>2015 г.</b></p> <p>3.1. Экспериментальное исследование осаждения из газовой фазы углеродных пленок на металлическую и графитовую поверхность в условиях наличия электропереноса.</p> <p>3.2. Провести численные моделирование перемешивания и осаждения примесей металлов в плазмотермическом реакторе при воздействии на расплав плазменной токовой струи.</p> <p>3.3. Провести расчетно-экспериментальное исследование синтеза диоксида титана анатазной кристаллической модификации при предварительном смешении реагентов, и в условиях встречной закалки.</p>		<p>Будут экспериментально определены условия формирования из газовой фазы углеродных пленок на цилиндрической и торцевой токонесущих поверхностях цилиндрического электрода плазмотрона постоянного тока.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.-м., с.н.с. Г.В. Ермолаев, н.с. С.П. Ващенко, асп. Д.Ю. Батомункуев.</p> <p>Будут получены характерные режимы течения шлака, содержащего примеси металлов в плазмотермическом реакторе.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», к.ф.м.н., с.н.с. А.В. Зайцев; м.н.с. А.М. Гурин; н.с. С.П. Ващенко</p> <p>Будут установлены рабочие параметры установки, при которых происходит плазмохимический синтез диоксида титана анатазной кристаллической модификации (размер частиц менее 5-30нм) с высоким выходом конечного продукта.</p> <p>Лаб. 9 «Физика плазменно-дуговых и лазерных процессов», д.ф.м.н., в.н.с. С.М. Аульченко; к.ф.-м.н., с.н.с. Е.В. Картаев; к.х.н., с.н.с. В.А. Емелькин.</p>	

Ожидаемые результаты		Содержание работы
2016 год	<p><b>Блок 1(2016): Теоретическое и экспериментальное исследование процессов лазерной обработки материалов.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Исследование отрывных течений газа при лазерной резке металлов с нейтральным газом для различных геометрий сопловой лазерной головки.</li> <li>- Исследование и моделирование физико-химических процессов лазерной резки низкоуглеродистых сталей с кислородом.</li> <li>- Разработка моделей, проведение численных исследований и визуализация газодинамических и двухфазных течений, создаваемых сопловыми насадками различных конструкций при лазерном легировании и наплавке.</li> </ul>	<p>Будет определены характерные зоны отрыва потока газа для различных типов используемых в лазерной резке сопел. Будет построена модель горения низкоуглеродистой стали применительно к лазерной резке с кислородом. Будет представлены результаты расчетов и визуализации газодинамических и двухфазных течений, создаваемых сопловыми насадками различных конструкций при лазерном легировании и наплавке.</p>
	<p><b>Блок 2(2016): Генераторы термической плазмы в технологиях нанесения покрытий и прототипирования изделий методами плазменного напыления и наплавки порошковых материалов</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Теплофизические исследования процесса воздушно-плазменного напыления жаростойких интерметаллидных покрытий из порошка сплава на основе никеля.</li> <li>- Исследования структуры и трибологических свойств полученных покрытий.</li> </ul>	<p>Будет разработана технология воздушно-плазменного напыления жаростойких покрытий.</p>



	<p><b>Блок 3(2016): Исследования физико-химических процессов в электродуговых технологиях переработки природного и техногенного сырья.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Исследование напряженности электрического поля на начальном и турбулентном участке столба электрической дуги высокого давления. Проектирование и создание лабораторного плазмотрона с МЭВ мощностью до 5 МВт и с рабочим давлением воздуха в дуговом канале до 50 атм.</li> <li>- Разработка инженерной методики расчета плавильных плазменнодуговых камер и исследование режимов осаждения примесей металлов в плазмотермическом реакторе.</li> <li>- Проведение теоретических и экспериментальных исследований высокотемпературного синтеза нанопорошков оксидных керамик (<math>TiO_2</math>, <math>SiO_2</math>) в зависимости от режимных параметров плазмохимической установки.</li> <li>- Плазменное напыление опорных корундовых покрытий на основе стандартного шлиф-порошка оксида алюминия и бимодальных покрытий на основе композитных порошков <math>Al_2O_3-8-13\%TiO_2</math>, полученных механическим смешением и просеиванием.</li> </ul>	<p>Будут определены закономерности изменения напряженности электрического поля столба дуги на ее начальном и турбулентном участках в зависимости от величины давления и расхода газа при токах 200-800 А. Будет спроектирован и изготовлен экспериментальный образец плазмотрона повышенной мощности и давления, конструкция будет иметь межэлектродную вставку, секции которой будут одновременно обеспечивать подачу плазмообразующего воздуха и охлаждение дугового канала.</p> <p>Будет рассчитаны оптимальные параметры расхода сырья и мощности плазмотрона для регулирования скорости осаждения примесей металлов в плавильной камере плазмотермического реактора</p> <p>Будут получены образцы порошков оксидных керамик (<math>TiO_2</math>, <math>SiO_2</math>), проведен анализ их фракционного и фазового состава в зависимости от режима и глубины закалки.</p> <p>Будут получены композитные покрытия на основе оксида алюминия с добавками субмикронного порошка диоксида титана, проведен анализ структуры и свойств покрытий в сравнении с опорными покрытиями из оксида алюминия.</p>
--	--	---