

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 535

№ госрегистрации 01201351881

Инв. № 5/17

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПМ СО РАН

чл.-корр. РАН


А.Н. Шиплюк
«29» декабря 2016 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0323-2014-0002

Приоритетное направление III.18. Физико-технические и экологические проблемы энергетики, тепломассообмен, теплофизические и электрофизические свойства вещества, 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.



А.М. Оришич

Новосибирск 2016

Список исполнителей

	подпись /	дата
Лаб.№3		
Оришич А.М.- д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб.3.		12.01.17
Яковлев Валериан Иванович - д.ф.-м.н., в.н.с		12.01.17.
Шулятьев В.Б.-д.т.н, с. н.с.		12.01.17.
Малов А.Н. к.т.н, с. н.с.		
Маслов Н.А. к.ф.-м.н., с.н.с.		12.01.17
Маликов А.Г - к.т.н, с.н.с.		12.01.17
Гольшев А.А. ,м.н.с.		12.01.2017
Лаб.№4,		
Яковлев Владимир Иванович - д.ф.-м.н., в.н.с		12.01.17.
Приходько Ю.М. к.ф.-м.н., нс,		12.01.17
Чехов В.П. м.н.с,		12.01.17
Лаб.№5,		
Киселева (Бобарыкина Т.А.) м.н.с.		12.01.2017
Чиркашенко В.Ф. к.т.н, с. н.с.		
МЦАИ		
Лебига В.А.- д.т.н., испол. дир. МЦАИ		12.01.2017
Пак А.Ю. -м.н.с		12.01.17

Реферат

Объем отчета: 53 стр., 44 рисунков, 5 таблиц.

Ключевые слова: Мощный CO₂ – лазер, волоконный лазер, мощный импульсно-периодический CO₂ – лазер, сверхзвуковой поток воздуха, оптический пульсирующий разряд (ОПР), лазерная резка, шероховатость поверхности, поглощенная энергия, безразмерные параметры, лазерная сварка, прочность сварного соединения.

Объект исследования: Процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Цель работы в целом по проекту: Основная цель проекта состоит в решении фундаментальной проблемы разработки физических основ теории взаимодействия лазерного излучения с веществом для создания новых высокоэффективных технологий.

Основная цель этапа 2016 г. состояла в разработке научных и методических основ создания с помощью лазерного высокоэнергетического воздействия и аддитивных технологий принципиально нового высокопрочного функционально-градиентного гетерогенного материала на основе комбинации различных порошков металлических и керамических материалов с использованием механического и термического воздействия.

Метод или методологию проведения работы: Успешность выполнения проекта обеспечило использование уникальных установок, созданных в ИТПМ СО РАН: непрерывного и импульсно-периодического CO₂-лазеров, средней мощностью до 5 кВт и с частотой следования импульсов до 150 кГц.

Методология основана на предложенном и развиваемом в течении последних 3-5 лет в ИТПМ СО РАН подходе к исследованию процессов воздействия мощного лазерного излучения на вещество, основанном на создании физической модели с нахождением законов подобия, определяющих безразмерных параметров и их критических значений, обуславливающих свойства исследуемого процесса.

Впервые развит комплексный подход для решения проблемы формирования структуры гетерогенного материала методами развиваемого в ИТПМ СО РАН нового научного направления – лазерная микро металлургия, основанного на интенсивном лазерном и последующими механическим и термическим воздействиями.

Краткое изложение важнейших результатов по проекту в целом и их новизны;

Разработаны новые физические модели взаимодействия излучения с веществом с учетом качества лазерного пучка и качества газового потока. Определены безразмерные параметры и законы подобия, определяющие свойства лазерной резки металлов. Найдены критериальные зависимости, определяющие качественный рез толстых (до 50 мм) стальных листов. Сформулированы оптимальные условия лазерной резки с минимизацией зоны термического влияния, т.е. термических напряжений и трещинообразования. Созданы инженерные соотношения и рекомендации для условий лазерной резки стали большой толщины. Впервые создан метод лазерной сварки для получения неразъемного соединения современного авиационного материала – алюминиевого сплава 1424 (Al-Mg-Li) с уровнем прочности равному уровню прочности основного сплава.

Экспериментально исследованы механизмы воздействия импульсно – периодического излучения на сверхзвуковые потоки воздуха и связь параметров лазерного излучения со структурой теплового следа. Сформулированы основные закономерности эффективности передачи энергии лазерного излучения в сверхзвуковые потоки воздуха, стабильности зажигания и поддержания ОПР и связи этих параметров с характеристиками потока и структурой теплового следа. Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с квазистационарными параметрами потока в тепловом следе, определенными на основе приближенных аналитических моделей.

Новизной полученных результатов обусловлена также и получением сравнительных характеристик (с использованием в волоконного и CO₂ лазеров непрерывного и импульсно периодического действия с длинами волн от 1.07 и 10.6 мкм при мощности 10⁷-10¹⁰ Вт/см²).

Все полученные важнейшие результаты получены впервые в мире и не имеют мировых аналогов.

Содержание

		стр.
	Реферат	
1	Введение	6
2	Основная часть. Этап 2016 года	10
2.1	Разработка методов улучшения физико-механических характеристик лазерных сварных соединений высоколегированных алюминиевых сплавов, с применением термической и механической обработкой сварных соединений.	10
2.2	Создание металлокерамических композиций с высокими механическими характеристиками на основе аддитивных технологий.	12
2.3	Экспериментальное исследование характеристик и их зависимости, нового типа неоднородностей на поверхности лазерного реза в виде кратеров, от параметров резки.	18
2.4	Исследование влияния состояния поляризации излучения на характеристики реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали CO ₂ -лазером.	21
2.5	Исследование возможности восстановления спектров возбуждения и флуоресценции отдельных флуорофоров по статистике спектров оптических фантомов структурно сложных объектов при мультиволновом возбуждении.	24
2.6	Вычислительное и экспериментальное исследование возможности использования диаметального дискового вентилятора для транспортировки и охлаждения газа в газодинамическом контуре CO ₂ -лазера.	30
2.7	Анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами в зависимости от относительной скорости движения поверхностей. Определение влияния успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал.	34
3	Итоговое обобщение результаты 2013-2016 гг..	37
3.1	Разработаны новые физические модели взаимодействия излучения с веществом с учетом качества лазерного пучка и качества газового потока.	37
3.2	Определены безразмерные параметры и законы подобия, определяющие свойства лазерной резки металлов.	38
3.3	Найдены критериальные зависимости, определяющие качественный рез толстых (до 50 мм) стальных листов.	39

3.4	Сформулированы оптимальные условия лазерной резки с минимизацией зоны термического влияния, т.е термических напряжений и трещинообразования.	40
3.5	Созданы инженерные соотношения и рекомендации для условий лазерной резки стали большой толщины.	41
3.6	Экспериментально исследованы механизмы воздействия импульсно – периодического излучения на сверхзвуковые потоки воздуха и связь параметров лазерного излучения со структурой теплового следа.	42
3.7	Сформулированы основные закономерности эффективности передачи энергии лазерного излучения в сверхзвуковые потоки воздуха, стабильности зажигания и поддержания ОПР и связи этих параметров с характеристиками потока и структурой теплового следа.	44
3.8	Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с квазистационарными параметрами потока в тепловом следе, определенными на основе приближенных аналитических моделей. Особое внимание будет уделено анализу перехода от нестационарных процессов к квазистационарному режиму течения;	46
4	Заключение	47
5	Список используемой литературы	49
6	Публикации по проекту за 2016 г. и за 2013-2016 гг	50

Введение.

Настоящий отчет является заключительным по теме: Разработка физических основ теории взаимодействия лазерного излучения с веществом для создания новых высокоэффективных технологий, по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

Цель работы в целом по проекту

Основная цель проекта состоит в решении фундаментальной проблемы разработки физических основ теории взаимодействия лазерного излучения с веществом для создания новых высокоэффективных технологий.

Основные блоки проекта

Блок 1. Блок исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом в процессе лазерной технологий.

Блок 2. Блок исследования взаимодействия мощного лазерного излучения со сверхзвуковыми потоками.

Задачи проекта на весь период выполнения проекта

Блок 1.

Произвести моделирование путем решения трехмерной дифракционной задачи численное моделирование и сравнение формирования излучения и структуры выходного пучка устойчивого и самофильтрующего (СФР) резонаторов. Важной особенностью моделирования будет сравнительный анализ влияния реального качества зеркал и разъюстировки резонаторов на фокусировку лазерного излучения сферической линзой. Анализ результатов численного моделирования и сравнение качества резки при одинаковых параметрах для устойчивого и СФР резонаторов позволит обосновать перспективность применения СФР для резки толстых материалов.

Провести комплексное экспериментальное исследование шероховатости поверхности реза различных (для начала для двух) сортов стали в зависимости от основных характеристик лазерного реза – мощности излучения, скорости и ширине реза, а также от характеристик материалов и при использовании кислорода в качестве вспомогательного газа. Использование CO_2 и волоконного лазера позволит впервые провести прямое экспериментальное сравнение характеристик резов при одинаковых условиях и одинаковых критериях качества и ответить на вопрос о влиянии длины волны излучения на процессы формирования поверхности. Изучить влияния на качество резки тепло - массообменных и физико-химических процессов в узкой щели лазерного реза для различного состава сталей, с учетом, например, эффектов поверхностного натяжения и наличия в стали примесей различных элементов.

Разработать методы измерения основных энергетических потоков: поглощаемой энергии излучения (коэффициент поглощения) при длине волны 10,6 мкм и 1,07 мкм, тепловые потери,

затраты энергии на нагрев и испарение металла и энергия химической реакции. Полученные данные позволят впервые построить полный энергетический баланс лазерной резки для двух длин волн, определить ее энергетическую эффективность в зависимости от качества поверхности и явятся основой для верификации численных моделей. Провести обобщение полученных на предыдущих этапах экспериментальных данных. Определить законы подобия и безразмерные параметра, определяющие шероховатость поверхности, с учетом изменения длины волны излучения (1.06 и 10.6 мкм) и технологического газа (O_2 и N_2). Сделать выводы о закономерностях качественной лазерной резки для технологических приложений

Блок 2.

Провести экспериментальное исследование механизмов воздействия импульсно – периодического излучения на сверхзвуковые потоки воздуха, поиск и определение связи параметров лазерного излучения со структурой теплового следа.

Подготовка аэродинамической установки МАУ-М с диаметром сопла 50 мм, оптической и многоканальной измерительно-регистрирующей системы для проведения экспериментов в воздушном сверхзвуковом потоке при числах Маха $M=1.5$.

Проведение серий экспериментов с оптической визуализацией динамики волновой структуры, регистрацией пространственного (вдоль и поперек следа) распределения давления (полного и статического) и температуры торможения в тепловом следе за областью оптического разряда в диапазоне частот следования лазерных импульсов 10–80 кГц.

Проведение серий экспериментов по исследованию теплового следа с использованием термоанемометра в диапазоне частот 10–80 кГц следования лазерных импульсов. Оптимизация работы дискового вентилятора для увеличения скорости потока в газодинамическом контуре CO_2 -лазера.

Исследование основных закономерностей эффективности передачи энергии лазерного излучения в сверхзвуковые потоки воздуха, стабильности зажигания и поддержания ОПП и связи этих параметров с характеристиками потока и структурой теплового следа. Разработка системы генерации лазерного излучения до частот 120-150 кГц. Проведение серий экспериментов с оптической визуализацией динамики волновой структуры, регистрацией пространственного (вдоль и поперек следа) распределения давления (полного и статического) в тепловом следе за областью оптического разряда и температуры торможения в диапазоне частот следования лазерных импульсов 120-150 кГц. Проведение серий экспериментов по исследованию теплового следа с использованием термоанемометра в диапазоне частот следования лазерных импульсов 120-150кГц.

Произвести сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с квазистационарными параметрами потока в тепловом следе, определенными на основе приближенных ана-

литических моделей. Особое внимание будет уделено анализу перехода от нестационарных процессов к квазистационарному режиму течения.

Разработать модели структуры течения в тепловом следе с использованием размеров и конфигурации каверн и данных пространственного (вдоль и поперек следа) распределения давления (полного и статического) в тепловом следе за областью оптического разряда и температуры торможения. Определение безразмерных параметров, обуславливающих эффективность процесса передачи энергии лазерного излучения в сверхзвуковой поток воздуха.

Цели этапа 2016 г.

1. Разработка методов улучшения физико-механических характеристик лазерных сварных соединений высоколегированных алюминиевых сплавов, с применением термической и механической обработкой сварных соединений.

2. Создание металлокерамических композиций с высокими механическими характеристиками на основе аддитивных технологий.

3. Экспериментальное исследование характеристик и их зависимости, нового типа неоднородностей на поверхности лазерного реза в виде кратеров, от параметров резки.

4. Исследование влияния состояния поляризации излучения на характеристики реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали CO₂-лазером.

5. Исследование возможности восстановления спектров возбуждения и флуоресценции отдельных флуорофоров по статистике спектров оптических фантомов структурно сложных объектов при мультиволновом возбуждении.

6. Вычислительное и экспериментальное исследование возможности использования диаметрального дискового вентилятора для транспортировки и охлаждения газа в газодинамическом контуре CO₂-лазера.

7. Анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами в зависимости от относительной скорости движения поверхностей. Определение влияния успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал.

Задачи этапа 2016 г.

Развитие нового научное направление – лазерная металлургия. Данное направление основано на изучении физического взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом с целью управления микроструктурой (размер зерна, текстура и т.д.) и механическими свойствами (прочность, твёрдость, остаточные напряжения, абразивный износ и т.д.). Для решения одной из актуальных задач, лежащих на стыке механики, материаловедения и физики состоит в разработке подходов и методов проектирования определенной структуры материалов, которая обес-

печивает требуемые функциональные и конструкционные свойства изделий. Для решение задачи необходимо выполнить следующие подзадачи исследований.

Подзадачи этапа 2016 г.

1. Установление влияние термической и деформационной обработки, применяемой к сварному соединению на механические свойства сварных соединений.
2. Получение гетерогенный материал на основе керамики WC с малым абразивным износом.
3. Выявление влияние параметров лазерной резки на структуру и размер неоднородностей в виде кратеров
4. Определение влияние линейной поляризации излучения на качество поверхности реза.
5. Выяснение возможность определения свойств неизвестных флуорофоров присутствующих в структурно сложных объектах, что может быть использовано, например, для лазерной медицинской флуоресцентной диагностики.
6. Установление механизмы формирования потока газа с помощью дискового вентилятора в контуре газодинамического CO₂-лазера.
7. Проведение анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами. Будет определено влияние успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал.

Этап 2016 г. является переходным этапом проекта для заявки на проект НИР 2017-2020 гг. «Разработка научных основ создания принципиально нового высокопрочного функционально-градиентного гетерогенного материала на основе лазерных и аддитивных технологий». Цель, которого состоит в разработке научных и методических основ создания принципиально нового высокопрочного функционально-градиентного гетерогенного материала на основе комбинации различных порошков металлических и керамических материалов, легирующих добавок, с использованием механического и термического воздействия с помощью лазерного высокоэнергетического воздействия и аддитивных технологий.

2. Основная часть. Задание на 2016 г.

2.1. Разработка методов улучшения физико-механических характеристик лазерных сварных соединений высоколегированных алюминиевых сплавов, с применением термической и механической обработкой сварных соединений.

Введение

Во Всероссийском институте авиационных материалов разработаны современные алюминиевые сплавы среднепрочный коррозионностойкий алюминиевый сплав 1424 системы Al-Mg-Li [1] и являющийся одним из наиболее перспективных сплавов для создания сварного фюзеляжа аэробусов. Особый научно-практический также интерес представляют сплавы системы Al-Cu-Li, которые обладают наилучшим среди алюминий-литиевых сплавов сочетанием удельной прочности и высокой коррозионной стойкости [1], в ФГУП «ВИАМ» создан высокопрочный сплав В-1469 [1].

К настоящему времени уровень прочности сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов типа 1469 и 1424, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), электронно-лучевой сваркой, автоматической аргодуговой сваркой и лазерной составляет 0,65–0,8 от прочности исходного сплава [2-5] без последующей обработки сварного соединения. Проведено исследование процесса лазерной сварки алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li с применением холодной пластической деформации и сплава системы Al-Cu-Li и термической обработки с целью получения высокопрочного сварного соединения. В результате прочность пластически деформированного сварного шва, алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li составило 0,95 и 0,6 соответственно от прочности основного сплава. Применение термообработки к сплаву Al-Cu-Li позволило увеличить прочность сварного соединения в 1,5 раза в отличие от традиционного метода

Методика эксперимента

Лазерная сварка (ЛС) алюминиевых сплавов толщиной 1,6 мм осуществлялась на автоматизированном лазерном технологическом комплексе “Сибирь-1” разработанный в ИТПМ СО РАН, включающем непрерывный CO₂-лазер с мощностью до 8 кВт.

С целью возможности повышения прочностных свойств, сварной шов подвергался холодной пластической деформации на прессе. Так же для установления влияния холодной пластической деформации на прочностные свойства сплавы подвергались аналогичной обработке. В результате проведенных исследований установлено, увеличение прочности сварного соединения (см. рис. 1). При этом существует зависимость прочности сварного соединения и основного сплава от деформации $\varepsilon = (h_0 - h)/h_0 \cdot 100\%$ (h_0, h – толщина образца до и после деформации). На рис.2.1.1 представлены зависимости прочности основного сплава, а также прочности шва, подвергаемого пластической деформации путем прессования, от деформации ε . Прочность сварного

соединения в отсутствие деформирования приближенно равна 360 МПа для сплава 1424 и 290 МПа для сплава В-1469.

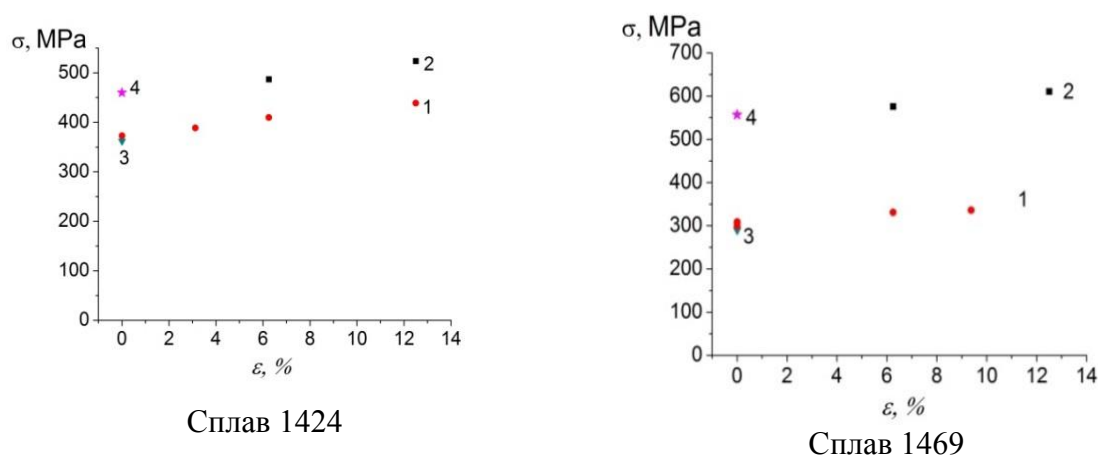


Рис.2.1.1. Зависимость прочности сварного соединения и основного сплава от деформации ε :

- 1 - прочность сварного шва после пластического прессования; 2- прочность основного сплава после пластического прессования; 3- прочность лазерной сварки; 4 - прочность сплава.

Прочность пластически деформированного сварного шва, алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li составило 0,95 и 0,6 соответственно от прочности основного сплава.

Для сплава Al-Cu-Li разработаны и исследованы режимы закалки и искусственного старения, позволяющие получать максимальный уровень прочности при изготовлении технологических листов. При выборе режимов термообработки сварного соединения использовались данные работ [5]. После сварки они подвергались термообработке. Исследовалось влияние каждой термической процедуры на изменение прочности. Для сравнения влияния термообработки на прочностные свойства сплава и шва образцы основного сплава без сварного шва так же подверглись термообработке. Необходимо отметить, что, как при наличии шва, так и при его отсутствии термической обработке подвергался весь образец.

В результате исследований установлено, что термообработка сварного шва позволило увеличить прочность в 1,5 раза в отличие от традиционного метода для сплава 1469 рис. 2.1.2.

При полной термообработке (закалка +искусственное старение) прочность сварного соединения выше прочности сплава, подвергнутого аналогичной обработке рис. 2.1.3. Процедура предварительного отжига и полная термообработка позволяют получить прочность 0,85 от прочности основного материала в состоянии поставки T1, что равняется прочности сплава, подвергнутого аналогичной обработке. Микроструктура сварного соединения улучшается рис. 2.1.4.

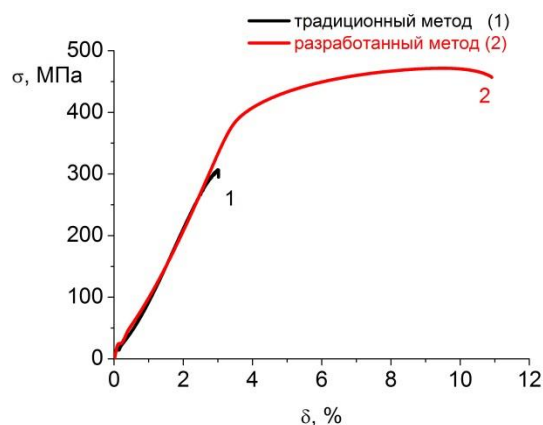


Рис. 2.1.2 Зависимость напряжения σ от деформации δ для традиционного и разработанного метода



Рис. 2.1.3 Разрушение по основному сплаву
Прочность шва выше прочности сплава!

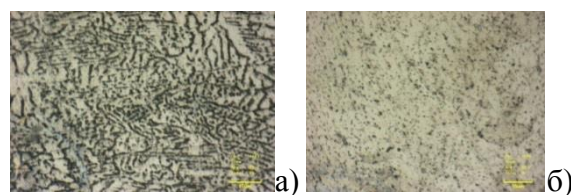


Рис. 2.1.4 Улучшение микроструктуры от традиционного метода(а) к разработанному(б)

Результат исследований: установлено влияние термической и деформационной обработки, применяемой к сварному соединению на механические свойства сварных соединений.

2.2. Создание металлокерамических композиций с высокими механическими характеристиками на основе аддитивных технологий.

Введение

Лазерно-порошковая наплавка активно исследовалась в мире последние годы, как метод упрочнения улучшение износостойкости поверхности, создания высокопрочного режущего инструмента, восстановление изношенных деталей и т.п.

Для увеличения износостойкости наплавляемых слоев используют металл композитные порошки на основе сплавов Ni-Cr и Co-Cr смешанными с карбидами и боридами [6].

В работах [7] показано, что характеристика абразивного износа покрытий на основе Ni с включением WC зависит от объемной доли и распределения частиц WC в получаемых покрытиях. Основные исследования направлены на уменьшение образования трещин в наплавленных слоях [8]. Так же исследователи изучают микроструктуру наплавленных слоев и стабильность процесса, микротвердость [9].

Однако, исследование механические свойства создаваемых деталей, прочность, абразивная и ударная стойкость и т.п., фактически – эксплуатационные возможности продуктов технологии

в абсолютных цифрах, не приводится. В данной работе исследуется процесс лазерной наплавки инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 аналог стали класса M2 (USA) и HS6-5-2 (EU) обладающая высокой твердостью и смесь самофлюсующегося порошка Ni-Cr-B-Si-C, имеющие хорошие характеристики в условиях абразивного воздействия, и карбида вольфрама [10].

В данной работе проводится исследование и сравнение в абсолютных значениях износостойкость полученных наплавленных слоев.

Лазерная наплавка быстрорежущей стали.

Исследована технологическая возможность изготовления биметаллического материала с матрицей из низколегированной стали и рабочими поверхностями из быстрорежущей стали Р6М5 (хим. состав представлен в таб. 2.2.1) методом лазерной наплавки.

Порошок Р6М5 распределялся перед лазерной обработкой на поверхности основы без какого-либо связующего с помощью специального дозатора-кристаллизатора. Основой служили листовые заготовки в виде диска толщиной 2 мм, изготовленные методом лазерной резки из стали 65Г (хим. состав представлен в таб. 2. 2.1) после полной закалки и отпуска на твердость 45 HRC.

Таблица 2 2.1. Химический состав в % материала.

Материал	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo	Fe	Ni	B
Р6М5	0.84	0,48	0,5	3,9	6,1	1,9	4,9	осн.		
65Г	0,62-0,7	0,17- 0,37	0,9- 1,2	0,25				осн.		
ПГ-10Н-01	0.4	2.6		13.5					осн.	2.0

Исходный порошок с частицами диаметром до 150-170 мкм имеет структуру, характерную для порошковой стали, полученной методом распыления жидкой фазы - дендриты твердых растворов с дисперсными выделениями карбидов.

Взаимодействие основного и наплавленного металла происходит, главным образом, по границам аустенитных зерен. Оплавленные зерна при охлаждении становятся центрами роста дендритных кристаллов наплавки (рис. 2.2.1). При увеличении толщины порошкового слоя, подвергаемого лазерной обработке, глубина проплавления основы уменьшается. При толщине обрабатываемого слоя более 2 мм появляются не сплавившиеся с основой участки, разделенные с ней пленкой окислов.

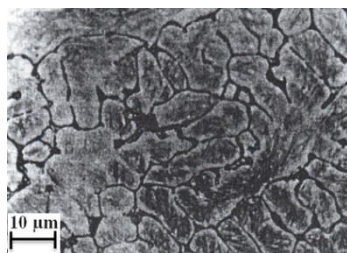


Рис.2. 2. 1 Металлографический анализ

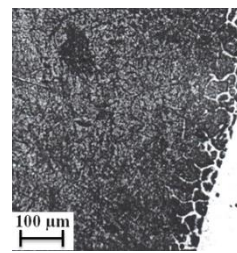


Рис. 2.2.2 Инфильтрация наплавленного

однослойной наплавки стали Р6М5.

слоя Р6М5 в основу 65Г.

Основа в зоне лазерного влияния (ЗЛВ) приобретает структурную неоднородность (рис. 2.2.2), которая является следствием неполной закалки стали 65Г, имеющей в данном случае строчечное распределение карбидов.

Структура наплавляемой стали Р6М5 имеет дендритное строение (рис. 2.2.1). В сечениях ветвей дендритов высоколегированного аустенита располагаются кристаллы мартенсита. Карбиды выделились в междендритном пространстве в виде эвтектических колоний, а также цепочками отдельных частиц, которые местами образуют сплошной каркас. Микротвердость аустенито-мартенситной смеси в зоне сплавления с основой составляет 9,48 - 10,1 ГПа, а в средней части и на поверхности - 10,1 - 10,9 ГПа.

Толщина полученного покрытия определяется назначением и видом наплавки. При необходимости наращивания покрытия возможна наплавка в несколько слоев. На рис. 2.2.3 показана схема формирования структуры наплавленной быстрорежущей стали при лазерной многослойной наплавке в несколько слоев

Толщина повторного и последующих слоев в эксперименте выбиралась около 80% от глубины проплавления стали Р6М5. Нижние слои при послойной наплавке попадают в ЗЛВ. Выбранный режим повторного лазерного воздействия на ранее наплавленную сталь Р6М5 обеспечивает благоприятные изменения в распределении карбидов.



Рис.2.2.3 Схема многослойной наплавки

Лазерная наплавка в несколько проходов приводит к оплавлению сетки карбидов, разделяющихся на отдельные частицы (рис. 2.2.4 а), происходит коагуляция и растворение карбидов. Это, в свою очередь, увеличивает легированность аустенита, образующегося при последующей кристаллизации.



Рис. 2.2.4. Строение карбидной фазы наплавленного покрытия Р6М5 при лазерной наплавке в несколько проходов.

а – средняя часть покрытия, б- зона сплавления.

Изменение структуры наплавленной стали Р6М5 во фронте движения лазерного луча и после повторной лазерной переплавки представлены на рис.2.2.5. Во фронте переплавленного участка наблюдается увеличение травимости, обнаруживаются микропоры, имеются неметаллические включения. После переплавки карбидная эвтектика дробится на отдельные частицы. Общее количество карбидной фазы уменьшается. Одновременно увеличивается легированность твёрдого раствора.

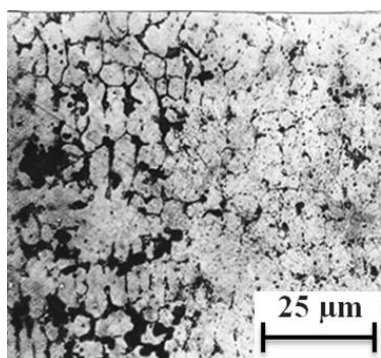


Рис. 2.2.5 Структура карбидной фазы при лазерной обработке наплавленного покрытия Р6М5.

Измерение микротвердости структурных составляющих ЗЛВ показаны на рис. 2.2.6. Микротвердость основы с исходной структурой - троостит отпуска, составляет 5 ГПа. В процессе лазерной обработки те участки основы, которые нагреваются ниже температуры аустенизации, испытывают отпуск и твердость их снижается до 3,5 ГПа. По краям ЗЛВ аустенит образуется в первую очередь вокруг карбидов. Эти участки аустенита, имеющие концентрационную неоднородность, при последующем охлаждении превращаются в аустенитно-мартенситную смесь с микротвердостью от 6 до 9 ГПа (светлые участки на рис. 2.2.2). На границе с наплавкой температура ЗЛВ обеспечивает гомогенизацию аустенита и последующую его закалку на мартенсит с микротвердостью 11 ГПа.

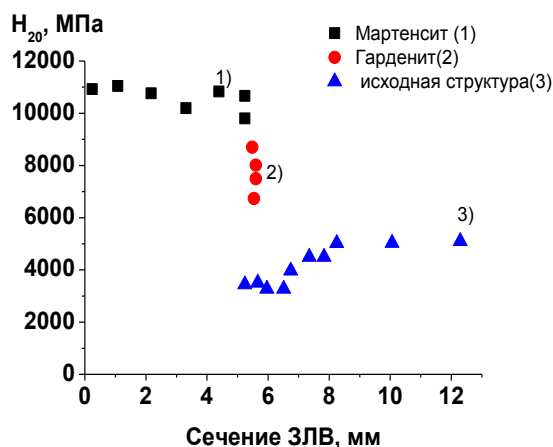


Рис. 2.6 Изменение микротвердости по сечению.

В металле основы имеет место повторная закалка. Твердость мартенсита составляет 8,740 ГПа. Получают развитие диффузионные процессы в зоне сплавления (рис. 2.2.4 б). Твердость ячеек дендритов изменяется незначительно и составляет 9,4 - 10,1 ГПа.

Послойным наращиванием удалось получить наплавленный слой толщиной до 8-10 мм без каких-либо макродефектов с твердостью 63 - 64 HRC. После стандартного трехкратного отпуска при 560°C твердость наплавленной стали Р6М5 увеличивается до 66 - 67 HRC.

Лазерная наплавка порошка никель-хромового сплав.

Исследована наплавка никель-хромового порошка износостойкого покрытия. В результате лазерного воздействия порошковый сплав полностью расплавляется и сплавляется с основой, образуя покрытие. Структура полученного покрытия дендрито-ячеистая (рис. 2.2.7). Тонко дифференцированная эвтектическая составляющая выделяется по границам дендритных ячеек. Выделения отдельных первичных карбоборидов не наблюдается. Твёрдый раствор имеет параметры, свидетельствующие о повышении концентрации в нём растворённых элементов. Это косвенно подтверждается в данной работе повышением микротвёрдости твёрдого раствора на 10 – 12 % по сравнению с твёрдостью, получаемой при объёмной термической обработке.

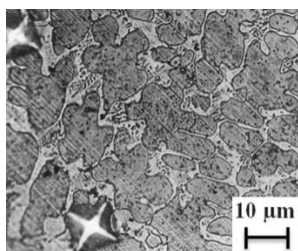


Рис. 2.2.7. Структура покрытия, оплавленного лазером CO₂ – лазера.

При испытании наплавленного самофлюсующегося никель-хромового сплава не наблюдалось охрупчивающего влияния сетки карбоборидов по границам дендритных ячеек. Было установлено, что увеличение доли твёрдых фаз в наплавленном покрытии снижает сопротивление ударно-абразивному изнашиванию. Структурные исследования показали, что это связано с выкрашиванием фрагментов покрытия по хрупкой карбидной сетке, выделившейся по границам дендритных ячеек. Однако, учитывая высокую твёрдость покрытия можно ожидать высокой его износостойкости при работе в массе абразивных частиц и трении о закреплённый абразив.

Лазерная наплавка Ni-Cr-B-Si-C сплава и карбида вольфрама.

С учётом полученных данных были составлены композиции наплавочных материалов из самофлюсующегося никель-хромового сплава ПГ-10Н-01 (хим. состав представлен в таб. 2.2.1) и карбида вольфрама, который вводили в виде тонкодисперсного порошка и в виде сфероидизованных частиц релита – плавленого карбида вольфрама.

Оскольчатая форма зёрен дроблёного литого карбида вольфрама благоприятна для использования его при упрочнении режущего инструмента. Однако при работе с ударными, циклическими нагрузками такие включения способствуют возникновению микротрещин и выкрашиванию износостойкой наплавки. Поэтому исследована технологическая возможность получения износостойкого покрытия из смеси порошкового самофлюсующегося сплава со сферическим релитом. Частицы релита преимущественно сферической формы имеют диаметр 53- 83 мкм. Порошковая шихта составлялась из 55% самофлюсующегося порошкового сплава ПГ-10Н-01 с добавлением 45% релита. Шихту укладывали на основу из конструкционной стали 65Г с помощью специального дозатора - кристаллизатора. Режим работы лазера был аналогичен наплавки никель-хромового сплава.

При плавлении Ni-Cr-B-Si-C сплава частицы релита остаются твёрдыми. Поверхность частиц карбида вольфрама растворяется в расплавленном никель - хромовом сплаве. Происходит взаимная диффузия компонентов, увеличивается количество карбидной эвтектики и мелких карбидов при последующей кристаллизации (рис. 2.2.8, а, б). Будучи тяжелее расплава, частицы релита опускаются к поверхности основы. На границе с основой образуется эвтектика с участием железа. При этом происходит термореактивное растворение основы стали с образованием лунок под частицами релита, что улучшает сцепление покрытия с основой. Частицы релита имеют весьма высокую твёрдость.

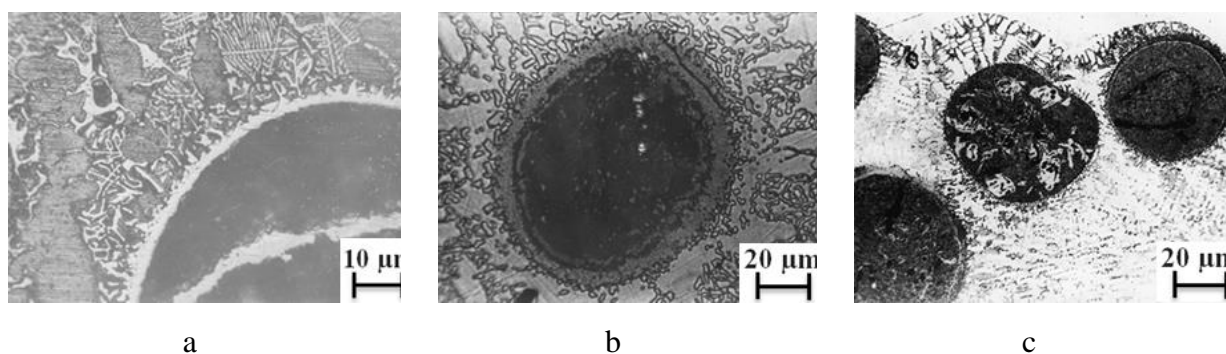


Рис.2.2.8 Структура покрытия после оплавлением лазера.

а,б – средняя часть наплавленного слоя, в – зона сплавления

Микротвёрдость, определённая на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 г., составила $H_{50} = 32,36$ ГПа. Для сравнения, микротвердость основы (сталь 65Г), закалённой при лазерной

обработке на мартенсит составляет $H_{50} = 10,7$ ГПа. Износостойкость полученного композиционного покрытия оценивали при трении о жёстко закреплённый абразив в соответствии с требованиями ГОСТ 17367-71. Одновременно испытывали образцы покрытия, полученные лазерной наплавкой износостойкого сплава ПГ-10Н-01, и наплавкой порошковой быстрорежущей инструментальной стали Р6М5. Появления трещин, отколов, выкрашивания наплавки во время испытаний не наблюдалось. Результаты испытаний приведены в таблице 2. 2. 2.

Таблица 2. 2. 2.

Состав покрытия	Твёрдость	$V_{\text{износа}}, 10^{-7}, \text{ кг/с}$
ПГ - 10Н - 01	HRC, 45 - 48	25,0
Р6М5	HRC, 66	15,6
ПГ - 10Н - 01 – 55 % ,Релит – 45 %	$H_{50}=32,36$ ГПа	4,9

Из приведённых данных следует, что износостойкость сплава ПГ - 10 Н - 01 при трении о жёстко закреплённый абразив увеличилась в 5 раз за счёт дополнительного упрочнения релитом сферическим и более чем в 3 раза превышает износостойкость быстрорежущей стали. Релит сферический можно рекомендовать в качестве компонента износостойких покрытий и наплавки для деталей, работающих в условиях абразивного износа: бурового инструмента, рабочих органов землеройных, строительных и дорожных машин, глиномесов, деталей металлургического оборудования и др.

Результат исследований:

Получен гетерогенный материал на основе керамики WC с малым абразивным износом.

2.3. Экспериментальное исследование характеристик и их зависимости, нового типа неоднородностей на поверхности лазерного реза в виде кратеров, от параметров резки.

Введение

Показателем качества лазерного реза в большинстве применений является шероховатость поверхности реза – характерная высота неоднородностей. Исследование структуры поверхности реза и механизмов её формирования оставалось одним из основных направлений исследований лазерной резки. Особенно интенсивно исследовались неоднородности типа регулярных рисок или борозд. Этот род дефектов связывают с нестационарным характером распространения фронта реза, он наблюдается при всех разновидностях лазерной резки. Исследованию дефектов другого вида и происхождения уделялось мало внимания.

При исследовании структуры поверхности реза после лазерно-кислородной резки стали в лаб. 3 ИТПМ СО РАН впервые обнаружен другой тип неоднородностей – типа лунок или кратеров, о котором ранее не сообщалось.

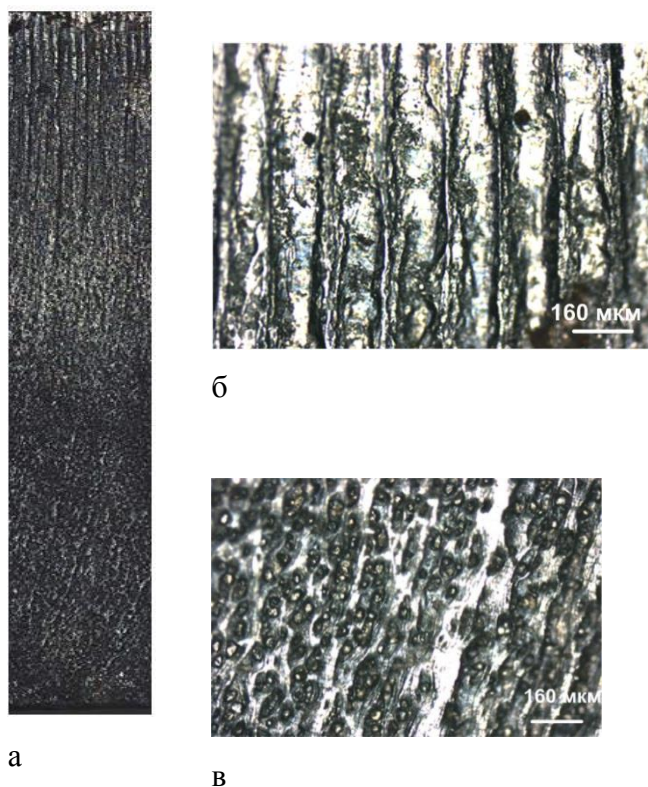


Рис. 2.3 1. Фотография поверхности реза при толщине листа $t = 16$ мм, мощность излучения 2,2 кВт и скорости резки 0,8 м/мин, *а* – вся поверхность, *б* – участок на расстоянии 1.5 мм от верхней поверхности листа, *в* – участок на расстоянии 4 мм от нижней поверхности листа.

Кратеры наблюдаются, преимущественно, в нижней части реза (рис. 2.3.1 в). На рис. 2.3.2. Показано увеличенное изображение кратера, полученное при помощи электронного микроскопа.

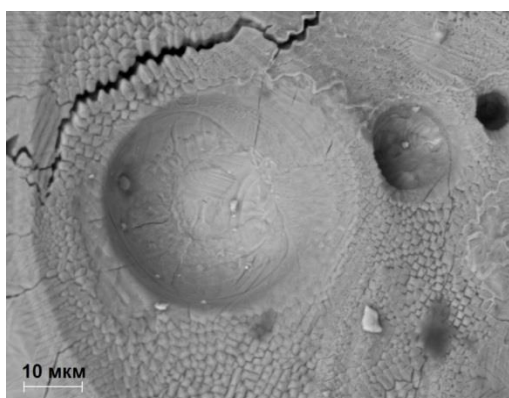


Рис. 2.3.2. Картина поверхности реза, $t = 16$ мм.
Электронный микроскоп.

Предложена гипотеза происхождения кратеров – они образованы каплями расплава, сорванными потоком газа с фронта реза, и попавшими затем на жидкую плёнку на боковой поверхности реза непосредственно перед затвердеванием расплава. Срыв капель в условиях лазерной резки предсказывался ранее теоретически и наблюдался экспериментально.

Исследования показали, что поперечный размер d_c кратеров, их глубина и плотность N_c (количество на единицу площади поверхности реза) растут с толщиной t разрезаемого листа (рис. 2.3.3 и 2.3.4).

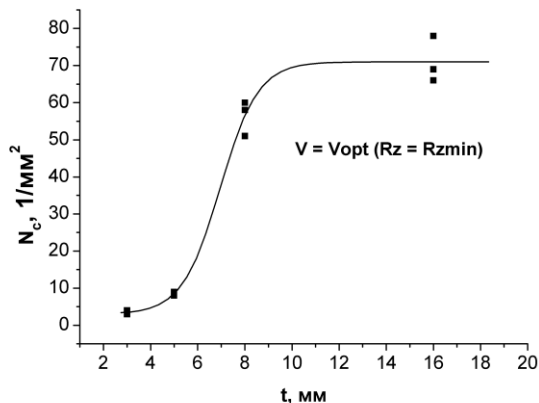
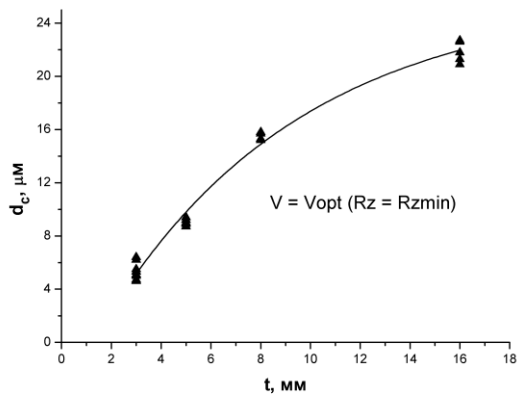


Рис.2.3.3. Зависимость диаметра d_c кратеров от толщины t листа.

Рис.2.3.4. Зависимость количества N_c кратеров на единицу поверхности реза от толщины t листа.

Резкий рост количества кратеров наблюдается при $t > 5...6$ мм. При $t = 10$ мм и более плотность кратеров по сравнению с малыми толщинами возрастает более чем в 10 раз, диаметр – в 4...5 раз.

На рис. 2.3.5 показано сечение поверхности реза на расстоянии 1.5 мм от верхней поверхности листа в направлении резки. Рельеф поверхности получен при помощи лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT.

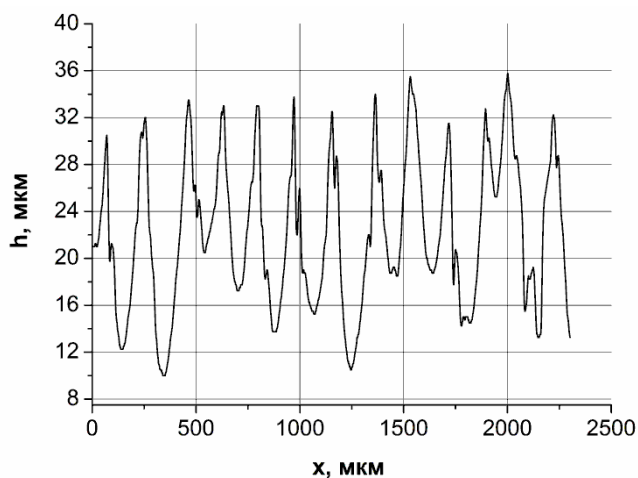


Рис. 2.3.5. Сечение профиля поверхности реза на расстоянии 1.5 мм от верхней поверхности листа.

Преимущественным типом неоднородности здесь являются регулярные риски. Характерная глубина кратеров в нижней части реза при $t = 16$ мм равна 10...30 мкм. Приблизительно такую же величину имеет и глубина бороздок, как это видно из рис. 2.3.5. При $t = 16$ мм на 1 мм^2 имеется около 70 кратеров, на 1 мм длины реза приходится 8..9 кратеров. Характерное расстояние между кратерами равно 100...120 мкм, что близко к шагу бороздок в верхней части реза. Таким образом, при большой толщине листа вклад кратеров в неоднородность поверхности сопоставим с вкладом бороздок. При малой толщине листа, когда плотность кратеров невелика, бороздки оказывают определяющее влияние на рельеф поверхности реза.

Значимость результата состоит в обнаружении нового типа неоднородностей поверхности лазерного реза – кратеров, и определении условий, при которых кратеры оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности. Влияние кратеров на рельеф поверхности существенно в случае толстых листов – при толщине более 5...6 мм. Построение адекватных моделей лазерной резки толстых листов невозможно без учёта гидродинамические процессы, ответственных за образование кратеров на поверхности реза. Известные модели лазерной резки образование кратероподобных структур не описывают.

Результат исследований: Выявлено влияние параметров лазерной резки на структуру и размер неоднородностей в виде кратеров

2.4. Исследование влияния состояния поляризации излучения на характеристики реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали CO₂-лазером.

Введение

При лазерной резке металлических материалов характеристики реза существенно зависят от состояния поляризации лазерного пучка. Излучение падает на фронт реза под скользящим углом. Излучение распространяется в узком канале, где возможны многократные отражения. Величина коэффициента поглощения и его пространственное распределение зависит от типа поляризации, геометрических характеристик канала, пространственных характеристик и условий фокусировки лазерного пучка. Уже в первых экспериментах по резке металлов CO₂-лазером с плоской поляризацией излучения было установлено, что максимальная скорость резки и форма канала реза зависят от взаимной ориентации плоскости поляризации и направления резки. Наибольшая скорость резки достигается, когда направление вектора электрического совпадает с направлением резки. Эта скорость превышает максимальную скорость резки при циркулярной поляризации. Однако, на практике излучение имеет круговую поляризацию в случае CO₂-лазера

и хаотическую в случае волоконного лазера, чтобы обеспечить одинаковые характеристики реза по разным направлениям.

Поскольку одним из преимуществ лазерной резки является высокое качество реза, а важнейшим его критерием во многих случаях служит шероховатость поверхности реза, актуальным является определение условий резки, обеспечивающих минимальную шероховатость. Максимальная скорость, вообще говоря, может не являться оптимальной с точки зрения качества реза.

Экспериментально установлено, что при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучением CO_2 -лазера с круговой поляризацией существует минимум шероховатости поверхности реза, который достигается при некотором оптимальном сочетании параметров резки (положения фокусного пятна относительно поверхности реза, скорости резки, толщины разрезаемого материала). На рис. 2.4.1, для примера, представлена зависимость шероховатости поверхности реза от скорости резки излучением с круговой поляризацией для толщины 5 мм. Видно, что имеется минимум шероховатости, измеренная вблизи нижнего края реза.

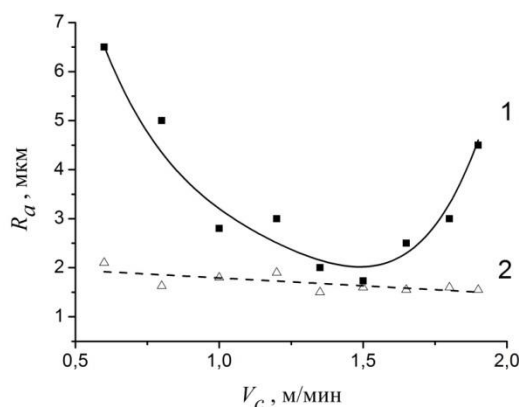


Рис. 2.4.1. Зависимость шероховатости поверхности реза от скорости резки излучением с круговой поляризацией. (1 – шероховатость вблизи нижней поверхности листа; 2 – шероховатость вблизи верхней поверхности листа).

Известно, от состояния поляризации излучения зависит максимальная скорость резки. В наших экспериментах по лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали CO_2 -лазером исследовалось влияние параметров резки на качество реза (шероховатость поверхности реза) при плоской поляризации излучения. Измерялась зависимость шероховатости R_a поверхности реза от скорости резки при лазерной мощности 1 кВт для двух случаев – когда вектор скорости параллелен и перпендикулярен вектору электрического поля. Положение фокуса выбиралось соответствующим минимуму шероховатости при отсутствии грата. На рис. 2.4.2. представлены результаты для толщины разрезаемого листа 5 мм.

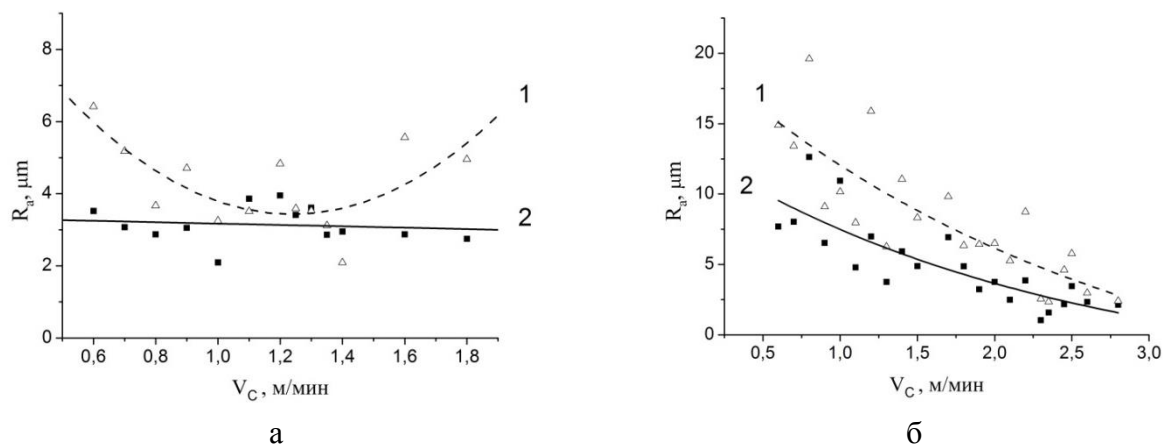


Рис. 2.4.2. Зависимость шероховатости поверхности реза от скорости резки излучением с линейной поляризацией (*а* – вектор \vec{E} направлен перпендикулярно вектору скорости резки, *б* – вектор \vec{E} направлен параллельно вектору скорости резки). (1 - шероховатость вблизи нижней поверхности листа; 2 - шероховатость вблизи верхней поверхности листа).

Видно, что все зависимости существенно различны. В случае, когда вектор \vec{E} перпендикулярен направлению скорости резки (рис. 2.4.2.а), имеется минимум шероховатости, хотя он и менее выражен по сравнению со случаем круговой поляризации. Когда вектор \vec{E} параллелен направлению скорости резки, шероховатость монотонно уменьшается с ростом скорости и достигает минимальной величины при максимальной скорости резки. Минимальная величина шероховатости в обоих случаях приблизительно одинакова.

Таким образом, характер зависимости шероховатости поверхности реза существенным образом зависит от состояния поляризации излучения и от ориентации направления резки относительно вектора \vec{E} при плоской поляризации. Скорость качественной резки при однонаправленных векторах электрического поля и скорости приблизительно вдвое больше по сравнению со случаем, когда эти вектора перпендикулярны. От ориентации вектора \vec{E} относительно направления скорости зависит не только коэффициент поглощения излучения, но и его распределение по трехмерной поверхности канала реза. С этим может быть связана физическая причина разной зависимости шероховатости поверхности реза от скорости для двух случаев ориентации вектора \vec{E} .

Результат исследований: Определено влияние линейной поляризации на качество поверхности реза.

2.5. Исследование возможности восстановления спектров возбуждения и флуоресценции отдельных флуорофоров по статистике спектров оптических фантомов структурно сложных объектов при мультиволновом возбуждении.

Введение

Спектроскопия лазерно-индуцированной аутофлуоресценции один из перспективных методов медицинской диагностики. Использование лазера с перестраиваемой длиной волны позволяет селективно возбуждать флуорофоры и получать диагностическую информацию, сравнивая спектры флуоресценции, полученные с использованием разных длин волн излучения, в том числе и по эффективности возбуждения. Анализ полученных матриц возбуждения-флуоресценции достаточно сложен.

В данной работе были с помощью оптических фантомов протестированы различные алгоритмы анализа матриц возбуждения-эмиссии флуоресценции образцов с неизвестным составом. Флуоресцентные краски в различных соотношениях смешивали до однородного состояния в физиологическом растворе. Для первого набора смешивали 3 флуорофора: пиридоксин, этакридина лактат, родамин (название смеси: PER). Общее количество смесей – 5. Так же готовили смеси этакридина лактат - флуоресцеин (название смеси: EF) для оценки способности метода разграничивать близкие по максимуму флуоресценции флуорофоры. Общее количество смесей – 4.

Исследуемую смесь наливали в кювету из нержавеющей стали, расположенную в защищенном от постороннего света ящике. В качестве источника возбуждающего излучения использовали лазерную систему Vibrant (HE) 355 II + UV (Opotek Ink) с оптопараметрической перестройкой длины волны. Регистрацию спектров лазерно-индуцированной флуоресценции осуществляли спектрометром Acton SpectraPro SP2300 (Princeton Instruments). Длины волн возбуждения сканировали в диапазоне от 220 до 290 нм с шагом в 10 нм, для каждой из них записывали спектр флуоресценции (260 – 830 нм с шагом в 0,5 нм). Полученные матрицы возбуждения-эмиссии нормировали на максимальную интенсивность, характерная матрица для трехкомпонентной смеси PER представлена на рис. 2. 5. 1.

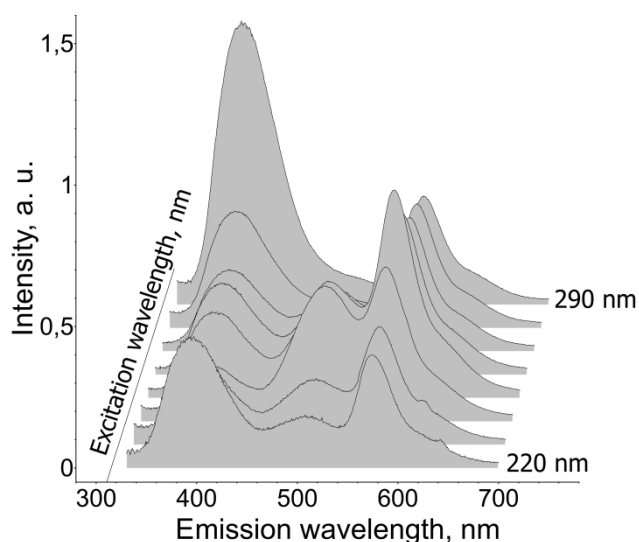


Рис. 2.5.1. Характерная матрица возбуждения-эмиссии для смеси PER.

В данной работе мы предлагаем две модификации метода главных компонент (МГК) для статистического анализа сложных матриц возбуждения-эмиссии для образцов с неизвестным составом: метод «узких пиков» и тензорный метод. При идентификации спектров флуоресцирующих компонент использовали модель однородного образца с равномерным распределением флуорофоров):

$$f(\lambda_{ex}, \lambda_{em}) = \sum_i^N a_i E_i(\lambda_{ex}) F(\lambda_{em}) \quad (2.5.1)$$

Здесь $f(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ – интенсивность флуоресценции на длине волны λ_{em} при возбуждении на λ_{ex} , $E(\lambda_{ex})$ – спектр возбуждения, $F(\lambda_{em})$ – спектр флуоресценции, i – номер флуорофора, N – общее число флуорофоров.

Метод «узких пиков»

Используя данный подход, мы анализируем только спектры флуоресценции, пренебрегая их зависимостью от длины волны возбуждения. Прежде всего, важно отметить, что главные компоненты, рассчитанные стандартным алгоритмом МГК, описывают все многообразие исходных спектров в матрицах возбуждения-эмиссии. При этом все главные компоненты, кроме первой, являются знакопеременными, т.к. по определению эти компоненты ортогональны. Данный факт не позволяет идентифицировать главные компоненты и сравнить их со спектрами конкретных флуорофоров, но можно отметить, что спектрам флуоресценции реальных веществ соответствуют линейные комбинации главных компонент. Поэтому следующим шагом являлся поиск данных линейных комбинаций, имеющих наиболее узкую форму спектров.

Используя метод перебора из главных компонент, рассчитанных стандартным алгоритмом NIPALS (non-linear iterative partial least squares), составлялись линейные комбинации (положительные для всех длин волн излучения). При этом вклад первой компоненты принимался единичным, а веса оставшихся компонент изменялись с шагом в 0,001. Каждая рассчитанная функция была нормирована на ее интегральную интенсивность. Локальные максимумы амплитуд в пространстве весов в данном случае представляли собой линейные комбинации спектров (наиболее узкие пики), наиболее точно описывающие исходные спектры.

Главные компоненты (PC), полученные из спектров флуоресценции всех смесей PER, показаны на рис. 2.5.2 а. Как можно видеть, положительной является только первая главная компонента, все остальные компоненты знакопеременны. Используя метод "узких пиков", были найдены линейные комбинации (NP), наиболее точно описывающие исходные спектры (рисунок 2.5.2 б). Видно, что все спектры положительны и имеют явно выраженные пики флуоресценции.

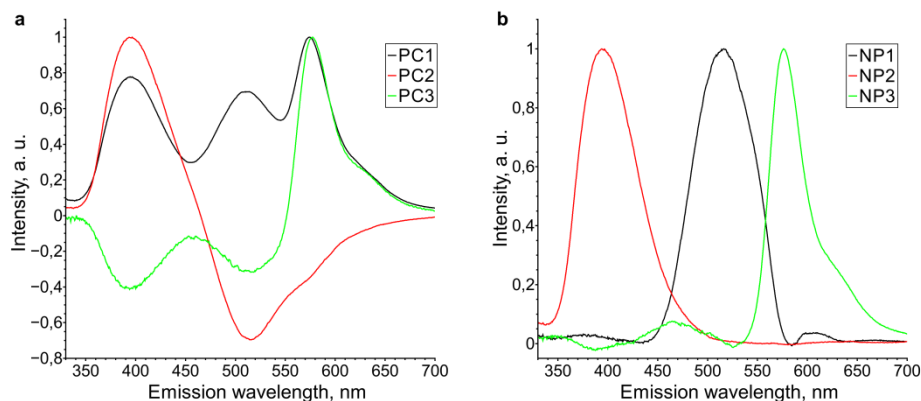


Рис. 2.5.2. (а) Спектры главных компонент; (б) спектры, рассчитанные по методу «узких пиков». $PC1$, $PC2$, $PC3$ – спектры трех главных компонент. $NP1$, $NP2$, $NP3$ – спектры, рассчитанные методом «узких пиков». Спектры PC и NP были рассчитаны для смесей PER.

Тензорный метод

Для вычисления главных компонент применяли алгоритм NIPALS в тензорном виде со следующими модификациями. Общее количество главных компонент задавали изначально, следуя первоначальному предположению об их числе в каждом конкретном типе образцов. После вычисления последней главной компоненты, первую компоненту уточняли, формируя разностный тензор с учётом остальных вычисленных компонент. Затем таким же образом поочередно уточняли последующие компоненты. Эту процедуру повторяли до стабилизации среднеквадратичного отклонения. Если выяснялось, что заданное общее количество главных компонент плохо описывает анализируемые матрицы, это значение меняли на более подходящее.

Ранее данный алгоритм был опробован на модельных матрицах возбуждения-эмиссии, составленных по формуле (1) из 4-х произвольно задаваемых пар спектров возбуждения и флуо-

ресценции. При вычислении первого приближения, главные компоненты оказываются знакопеременными, что соответствует наилучшему описанию статистических различий спектров. По мере итераций расчета графики сдвигаются в область положительных значений, и нескольких сотен итераций хватает для совпадения расчётных функций с исходными в пределах расчётов одинарной точности.

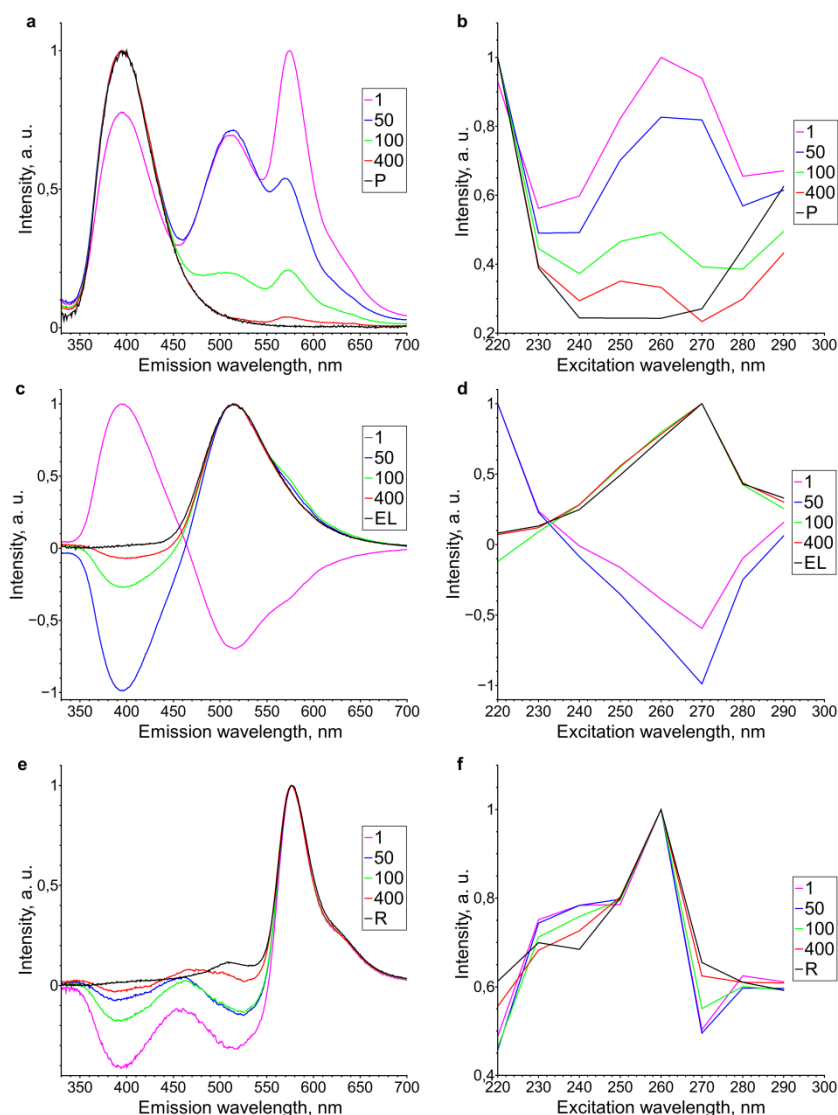


Рис. 2.5.3. Зависимость спектров флуоресценции (первая колонка) и возбуждения (вторая колонка) главных компонент от числа итераций расчета алгоритма МГК (1, 50, 100 и 400) для первой главной компоненты PC1. (a, b), второй главной компоненты (c, d), третьей главной компоненты (e, f). P, EL, R – спектры возбуждения и флуоресценции исходных веществ (пиридоксина, этакридина лактата и родамина).

Спектры PC были рассчитаны для смесей PER.

На рис. 2.5.3 показана зависимость от числа итераций расчета спектров возбуждения и флуоресценции главных компонент, полученных путем анализа матриц смесей PER модифициро-

ваным тензорным МГК. Рисунки 3а, 3с, 3е соответствуют спектрам флуоресценции, а рисунки 3б, 3д, 3ф соответствуют спектрам возбуждения. Каждый график содержит спектры главных компонент, полученные после 1, 50, 100 и 400 итераций работы алгоритма, а также спектры исходных веществ до смешивания (P, EL, R). Видно, что после 400 итераций расчета формы рассчитанных спектров флуоресценции и возбуждения становятся близкими к спектрам исходных веществ.

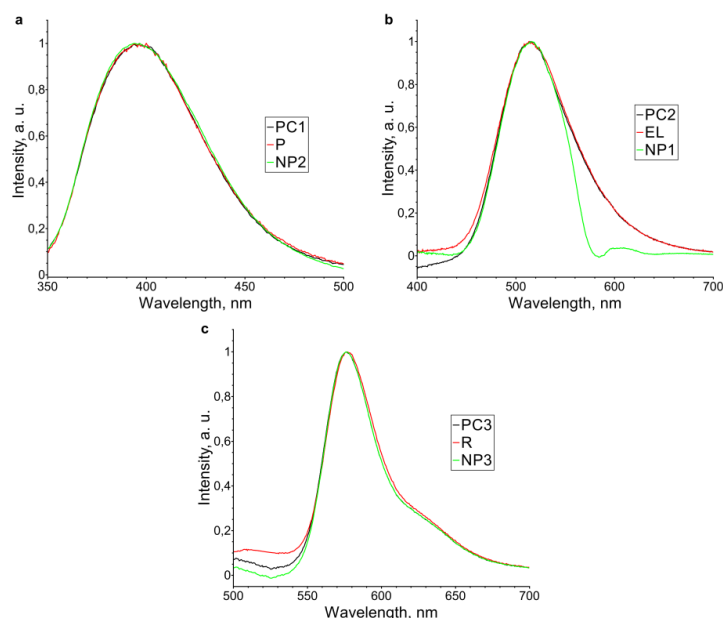


Рис. 2.5. 4. Сравнение спектров флуоресценции, рассчитанных методом «узких пиков» (NP) и модифицированным тензорным методом (PC), с исходными спектрами пиридоксина (а), этакридина лактата (b), родамина (с). P, EL, R – спектры флуоресценции исходных веществ (пиридоксина, этакридина лактата и родамина). Спектры PC и NP были рассчитаны для смесей PER.

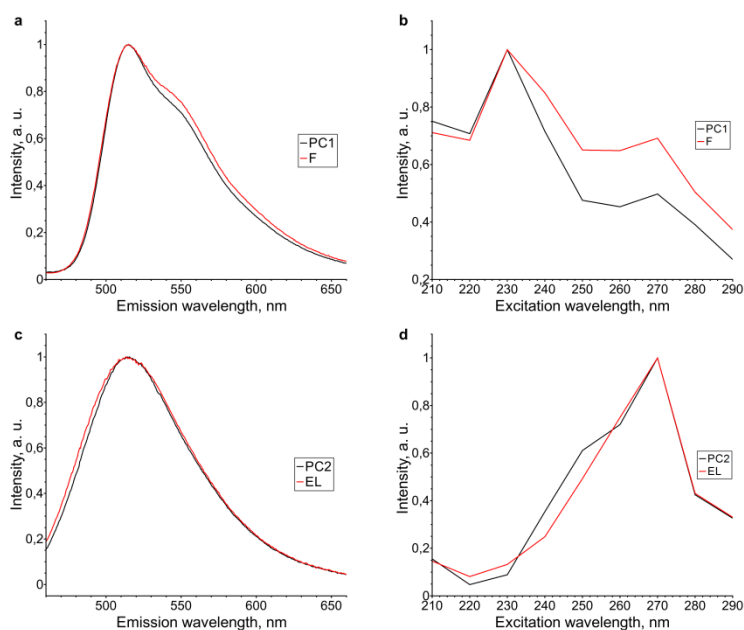


Рис. 2.5.5. Сравнение спектров флуоресценции (первая колонка) и возбуждения (вторая колонка) главных компонент (РС) с исходными спектрами флуоресцеина

(a, b) этакридина лактата (c, d). F и EL - спектры флуоресценции и возбуждения исходных веществ (флуоресцеина и этакридина лактата). Спектры РС были рассчитаны для смесей EF.

На рис. 2.5.4 представлено сравнение исходных спектров флуоресценции со спектрами, рассчитанными методом «узких пиков» и модифицированным тензорным методом. Видно, что почти все спектры флуоресценции хорошо повторяют друг друга. Однако, спектры полученные методом «узких пиков» оказываются уже, чем в действительности, из-за значительного перекрытия областей флуоресценции родамина и этакридина лактата. В общем случае данный способ также может быть использован для расчета реальных спектров из знакопеременных главных компонент, в случае, когда тензорный метод не применим по какой-либо причине, так как он все же позволяет выделять максимумы спектров флуоресценции флуорофоров. Однако метод «узких пиков» не дает информации о спектрах возбуждения. Модифицированный тензорный алгоритм МГК позволяет с хорошей точностью получить спектры возбуждения и флуоресценции составляющих смесь флуорофоров, и даже разделять близкие спектры, как показано на примере двухкомпонентных смесей EF (рис. 2.5.5).

Результат исследований Выяснена возможность определения свойств неизвестных флуорофоров присутствующих в структурно сложных объектах, что может быть использовано, например, для лазерной медицинской флуоресцентной диагностики.

2.6. Вычислительное и экспериментальное исследование возможности использования диаметрального дискового вентилятора для транспортировки и охлаждения газа в газодинамическом контуре CO₂-лазера.

Введение

Физические процессы при взаимодействии тлеющего разряда с потоком газа определяют характеристики CO₂-лазеров: удельный энерговыход, мощность излучения, устойчивость разряда и, как следствие, надежность и практическую значимость создаваемых электроразрядных CO₂-лазеров с конвективным охлаждением рабочей среды.

Для лазера замкнутого цикла, каким является технологический CO₂-лазер, газодинамические и оптические характеристики определяются эффективностью используемых теплообменных и прокачных устройств. Именно они определяют установившиеся распределения скорости потока, температуры и избыточного давления, возникающих в контуре лазера при выделении энергии в разрядной камере и потере энергии, особенно в случае работы при предельных энерговыходах. Поэтому исследования эффективности используемых теплообменных и прокачных устройств являются актуальными при разработке и создании новых устройств.

Опыт эксплуатации лазера с центробежным вентилятором показал, что повышение скорости потока газа, а, соответственно, и оборотов вентилятора, ограничено его механической прочностью. Повышение прочности возможно за счет уменьшения ширины рабочего колеса. А небольшая ширина приводит к неравномерности скорости потока и заставляет применять комплекс специальных мер для выравнивания скорости потока газа на всей длине разрядного промежутка, составляющей 1100 мм.

В качестве альтернативы предлагается использовать протяженные диаметральные дисковые вентиляторы, в которых ротор выполнен в виде набора плоских дисков, установленных соосно с некоторыми зазорами между ними. Ротор размещается в корпусе, который формирует зону входа и выхода газа. Передача кинетической энергии от ротора такого вентилятора к потоку газа происходит при помощи сил вязкого трения в пограничных слоях между вращающимися дисками и носит ламинарный характер. Возникающая при вращении дисков центробежная сила обеспечивает транспортировку газа. Данный тип вентилятора имеет ряд преимуществ перед традиционными вентиляторами:

- способен выдерживать большие нагрузки, возникающие при большом числе оборотов
- создаёт равномерный поток газа по всей ширине ротора
- с понижением давления растёт вязкость газа и падает эффективность обычных лопаточных вентиляторов, а эффективность дискового насоса трения, наоборот, растёт.

- большая рабочая поверхность ротора с дисками дает возможность совмещения в одном устройстве двух функций: нагнетание газа и его охлаждение, что позволяет исключить из контура теплообменник.

- использование двух подобных роторов позволяет убрать поворотные лопатки, снизив общее сопротивление газодинамического контура.

К недостаткам диаметрального дискового вентилятора можно отнести:

- эффективность дисковых вентиляторов ниже, чем лопаточных.
- существуют режимы, при которых наступает кризис расхода [11], когда резко уменьшается, вплоть до полного прекращения, объёмный расход газа.
- при использовании ДДВ в качестве вращающегося теплообменника значительно увеличивается сложность изготовления и балансировки, а также масса ротора.

Визуализация течения

Качество потока напрямую влияет на качество излучения лазера. Поэтому выявление любых неоднородностей течения газа в контуре нужно устранять. Однако визуализировать течения разреженного газа с относительно небольшими скоростями очень сложно. Известным способом визуализации является использование гидродинамических стенов. Поэтому визуализация была выполнена с использованием жидкости на стенде, схема которого представлена на рис. 2.6.1. Верхняя и нижняя крышка корпуса, а также диски ротора, были изготовлены из плексигласа, что позволило увидеть структуру течения жидкости в подводящем и отводящем каналах, а также, в междисковом пространстве ротора. Для ротора на стенде выполнялось условие геометрического подобия с коэффициентом 1:10. В качестве жидкости использовалась смесь воды с глицерином, что позволяло менять вязкость среды для подбора необходимого числа Рейнольдса.

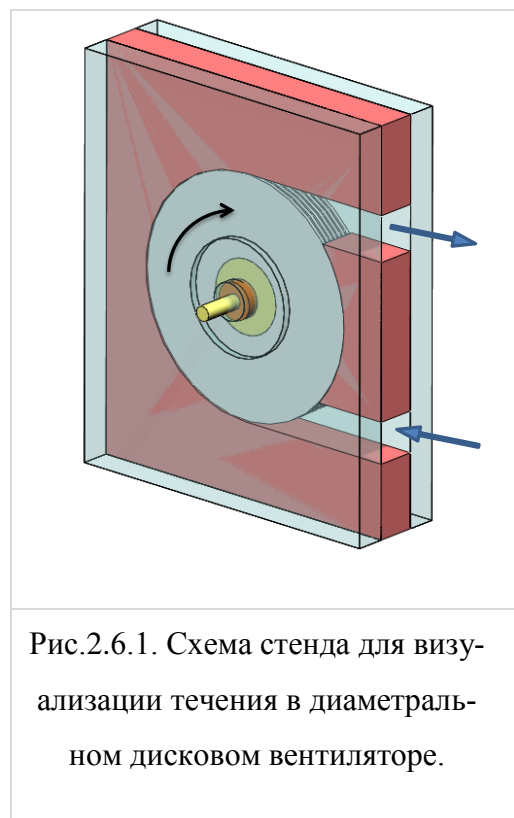


Рис.2.6.1. Схема стенда для визуализации течения в диаметральном дисковом вентиляторе.

В качестве параметров подобия были взяты числа Рейнольдса часто встречающиеся в литературе о дисковых насосах:

$$Re_b = \frac{\omega R_2 b}{\nu} \text{ Рейнольдса по междисковому зазору}$$

$$Re_r = \frac{(\omega R_2) \cdot R_2}{\nu} \text{ Рейнольдса по внешнему радиусу диска}$$

ω – угловая частота вращения ротора [рад/с]

ωR^2 – скорость внешней кромки диска [м/с]

b – междисковый зазор [м]

ν - кинематическая вязкость [м²/с]

Полное геометрическое подобие и возможность менять вязкость жидкости позволили, за счёт выбора нужного числа оборотов ротора, довольно точно подобрать параметры подобия. В таблице 2.5.1 представлено параметры моделирования течения воздуха в дисковом вентиляторе при низком давлении, с использованием 45% водного раствора глицерина.

Таблица 2.5.1

Устройство	R ₁ , мм	R ₂ , мм	B, мм	Ω, об/м	P, торр	ν , м ² /с	Re _b	Re _r
Воздушный вентилятор	120	250	5	600 0	10	1,1* 10 ⁻³	685,6	3,428* 10 ⁴
Водяной насос	12	25	0,5	222 0	750	3,1* 10 ⁻⁵	685,4	3,427* 10 ⁴

Характерные результаты визуализации течения водного раствора глицерина на гидродинамическом стенде можно видеть на рис. 2.6.2-2.6.3. На рис. 2.6.2. во входном и в выходном каналах можно наблюдать возникновение вихрей, которые затем перерастают в устойчивые структуры.

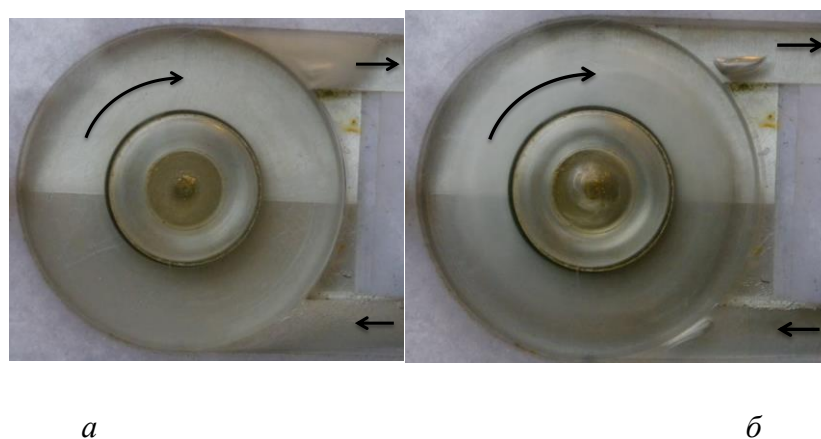


Рис. 2.6.2. Визуализации течения

а - вихревые течения на входе и выходе;

б - образование устойчивых структур на входе и выходе в отсутствие вихрей.

На рис. 2.6.3. можно наблюдать воздушный пузырь в междисковом пространстве ротора. Причём, при малых оборотах, когда расхода жидкости ещё нет, то нет и пузыря. С возникно-

вением расхода, появляется и пузырь. Далее, с увеличением числа оборотов (а, следовательно, с ростом расхода) растёт и размер пузыря.

Подключение датчиков давления позволяет измерить, как напор, создаваемый насосом, так и пульсации давления (рис.2.6.4).

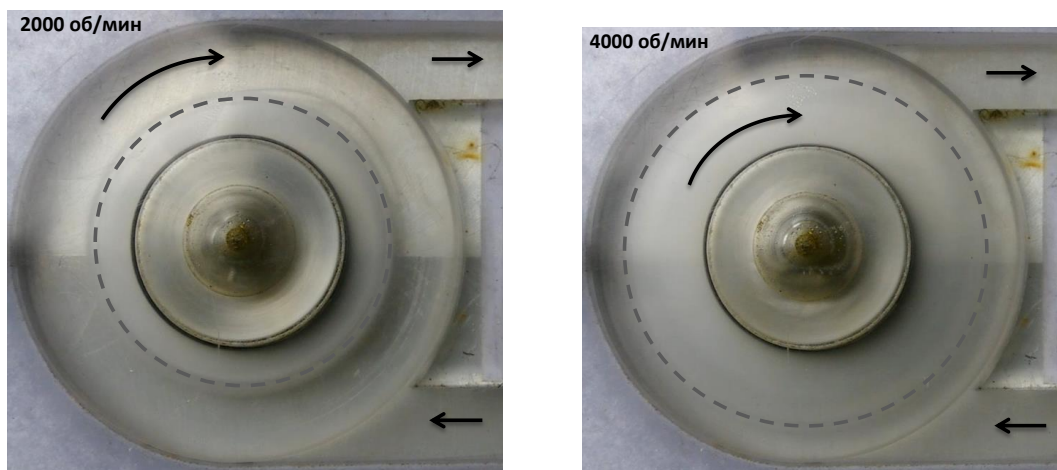


Рис. 2.6 3. Застойная зона в междисковом пространстве диаметрального дискового насоса при различном числе оборотов ротора.

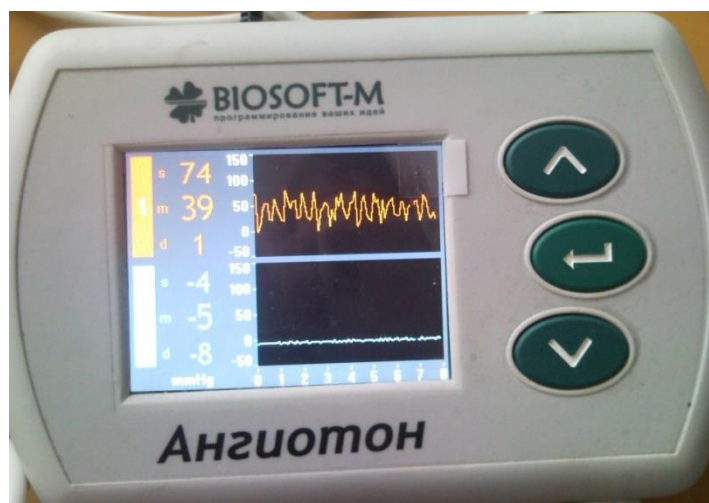


Рис. 2.6.4. Пульсации давления на выходе и на входе диаметрального дискового насоса.

Результат исследований Установлены механизмы формирования потока газа с помощью дискового вентилятора в контуре газодинамического CO₂-лазера.

2.7. Анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами в зависимости от относительной скорости движения поверхностей. Определение влияния успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал.

Датчик термоанемометра представлял собой вольфрамовую нить диаметром 20 мкм и длиной 3 мм. Датчик подключался к электронной схеме, которая поддерживала сопротивление нити постоянным. Первоначально измерялось сопротивление нити без нагрева. Затем в схеме устанавливалось более высокое сопротивление, что достигалось пропуском тока через нить и ее нагрева. Нагретая нить охлаждалась потоком газа. При увеличении скорости потока, охлаждение нити будет увеличиваться и схема будет увеличивать напряжение на нити так, чтобы сопротивление не менялось. При уменьшении скорости потока – напряжение будет уменьшаться. При увеличении температуры потока нить будет охлаждаться слабее и схема будет уменьшать напряжение на нити. При уменьшении температуры потока – напряжение будет возрастать.

Для калибровки датчика был создан стенд для реализации течения Куэтта в условиях различных, в том числе и низких давлений, больших чисел Кнудсена. Выполнены тарировки датчиков термоанемометра и проведено сравнение данных, полученных как в созданном стенде, так и в стандартных калибровочных установках. Получены зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса для тонких нитей в различных точках по длине кольцевого канала.

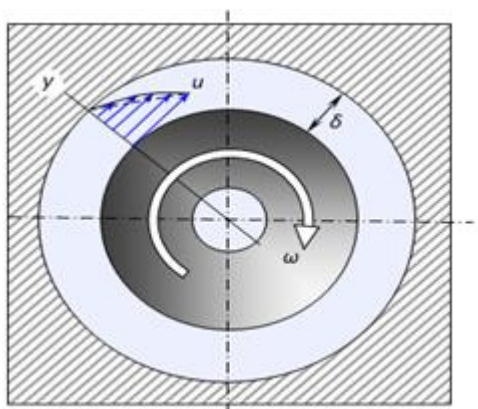


Рис. 2.7.1 Схема стенда для реализации течения Куэтта в кольцевом зазоре.

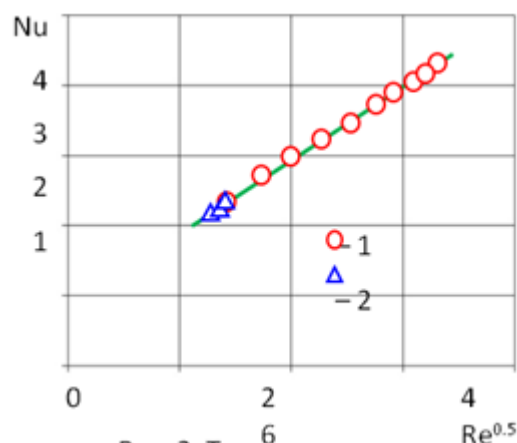


Рис. 2.7.2 Тарировка датчиков (1) в трубе DISA 55D41/42 (2) – в разработанной установке.

Для исследования возможностей датчика была проведена серия экспериментов по исследованию теплового следа с использованием термоанемометра в диапазоне частот 10–80 кГц следования лазерных импульсов.

Датчик термоанемометра с вольфрамовой нитью 20 мкм в диаметре и около 3 мм длиной, располагался на расстоянии $L = 15-17$ мм и мог перемещаться поперек следа (см. рис 2.7.3). Датчик был подключен к электронной схеме термоанемометра постоянной температуры.

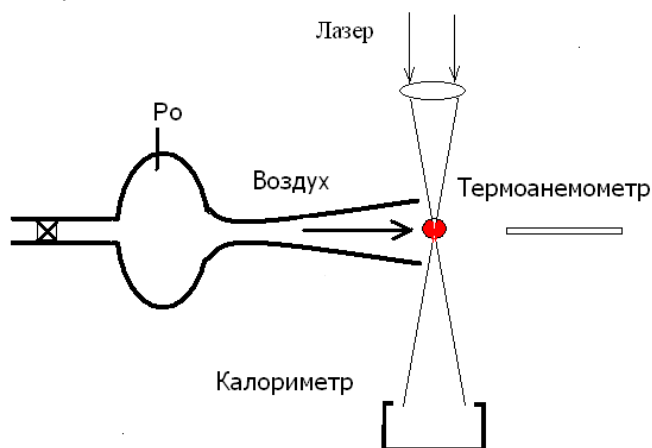


Рис. 2.7.3 Схема эксперимента.

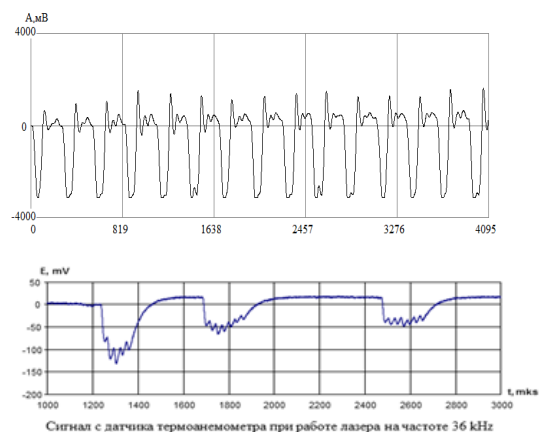


Рис. 2.7.4. Результаты регистрации каверн в сверхзвуковом потоке.

На рис. 2.7.4 приведены примеры сигналов с датчика термоанемометра, измеренные в следе за плазмой на расстоянии 15 мм. При работе лазера на частоте 30 и 36 kHz разряд был неустойчивым, с большим количеством пропусков, т.е. только часть импульсов зажигали разряд. На рис. 2.7.4 видны возможности датчика регистрировать, как надежно зажигаемый разряд четкой периодичностью каверн, так и участки с малой интенсивностью пульсаций и выбросов с периодической составляющей. Частота периодической составляющей равна частоте следования импульсов лазера. При работе лазера на частоте 50 kHz разряд был устойчивым. На всем протяжении сигнала видна периодическая составляющая с частотой 50 kHz.

На расстоянии 15 мм от плазмоида скорость потока составляет ~ 600 м/с. Таким образом расстояние между 2-мя соседними кавернами будет 20, 16.7 и 12 мм при частоте работы лазера 30, 36 и 50 kHz соответственно.

В спектрах сигналов (рис. 2.7.5) хорошо виден дискретный пик, соответствующий частоте следования импульсов лазера. На рисунке приведен пример спектра сигнала при работе лазера на частоте 50 kHz. Как видно из рисунка, хорошо видна не только основная частота, но и 2-я и 3-я гармоники.

С помощью датчика термоанемометра был измерен профиль средней температуры торможения поперек потока (рис. 2.7.6). В каждой точке измерялось сопротивление нити датчика без нагрева. Используя известную зависимость сопротивления от температуры, вычислялась температура. Измерения проводились на расстоянии 15 мм от плазмоида. Как видно из рисунка,

толщина каверны составляет ~ 2 мм. Т.к. расстояние между соседними кавернами ~ 12 мм, они не сливаются друг с другом.

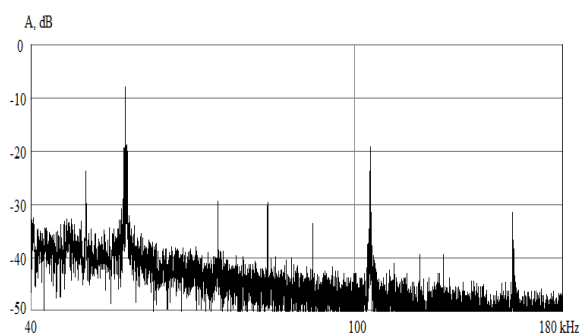


Рис 2.7.5. Спектр сигналов термоанемометра.

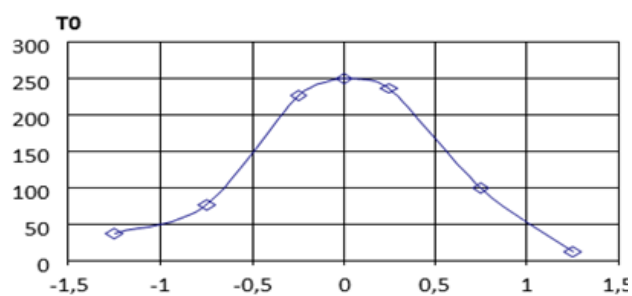


Рис. 2.7.6 Профиль средней температуры торможения поперек потока.

Результат исследований Проведен анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами. Определено влияние успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал.

3. Основные результаты исследований 2013-2016 гг.

3.1 Разработаны новые физические модели взаимодействия излучения с веществом с учетом качества лазерного пучка и качества газового потока.

Несмотря на большое количество исследований, полная и взаимосвязанная физическая картина лазерной резки к настоящему времени не создана. Существующие теоретические модели газо-лазерной резки не позволяют обосновать взаимосвязь оптимальных для резки параметров и закона их изменения с толщиной разрезаемого материала.

Трудность оптимизации качества реза связана, прежде всего, с многообразием и сложным взаимодействием протекающих при лазерной резке физических процессов.

В проекте впервые проведен экспериментальный поиск безразмерных параметров и законов подобия, определяющих свойства лазерной резки металлов двумя типами лазеров: CO₂ (10.6 мкм) и волоконный (1.06 мкм). Шероховатость поверхности R_z может быть представлена, как функция следующих параметров:

$$R_z = F(W, V_C, t, b, \Delta P, \rho_g, \mu_g, \mathfrak{R}_m^i, f), \quad (3.1.1)$$

где W – мощность излучения; V_C – скорость резки; t – толщина стального листа; b – ширина реза; ΔP – перепад давления технологического газа на толщине листа; ρ_g, μ_g – плотность и динамическая вязкость технологического газа. Символом \mathfrak{R}_m^i обозначены все параметры разрезаемого материала, такие как: $C_m, \lambda_m, \rho_m, T_m, L_m$ – теплоемкость, теплопроводность, плотность, температура и теплота плавления и т. п., f – фокусное расстояние линзы.

Обработан большой массив экспериментальных данных и установлено, что шероховатость поверхности R_z поверхности реза может быть выражен через функционал от обобщённых безразмерных переменных, который в общем виде не зависит от типа лазера:

$$R_z/t = f(Pe, Q_w, b/t, A_i), \quad (2)$$

здесь $Pe = Vb/\gamma$ - число Пекле, $Q_w = W/(\lambda t T_m)$ - безразмерная лазерная мощность. Вид данного функционала представлен на рис. 3. 1.1.

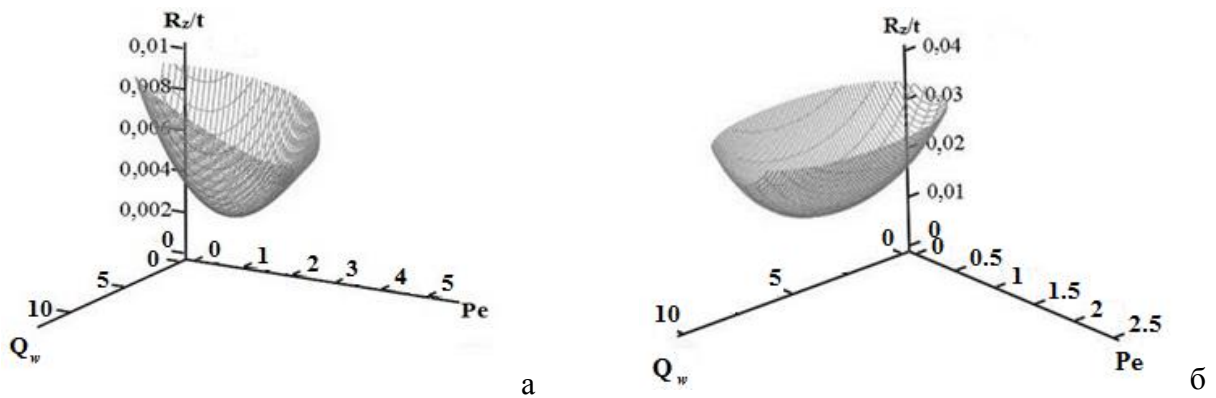


Рис. 3.1.1. Зависимость шероховатости от безразмерных переменных

a – CO₂ лазер и *б* – волоконный лазер.

3.2 Определены безразмерные параметры и законы подобия, определяющие свойства лазерной резки металлов.

Проведена оптимизация лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали. Обработан большой массив экспериментальных данных и установлено, что условия получения качественного реза с минимальной шероховатостью R_z поверхности реза могут быть выражены через обобщённые безразмерные переменные $Pe = Vb/\gamma$ - число Пекле, $Q_w = W/(\lambda t T_m)$ - безразмерная лазерная мощность, t – толщина листа, W, V, b - оптимальные значения лазерной мощности, скорости резки и ширины реза, γ, λ, T_m – теплофизические характеристики материала, A_i – переменные, описывающие параметры системы фокусировки и подачи вспомогательного газа.

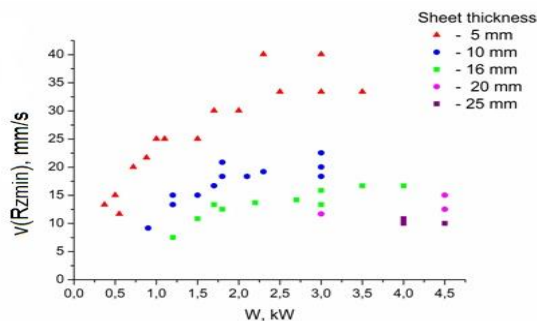


Рис.3.2.1. Зависимость оптимальной скорости резки от мощности при различной толщине листа в координатах W, V_c (CO₂ лазер)

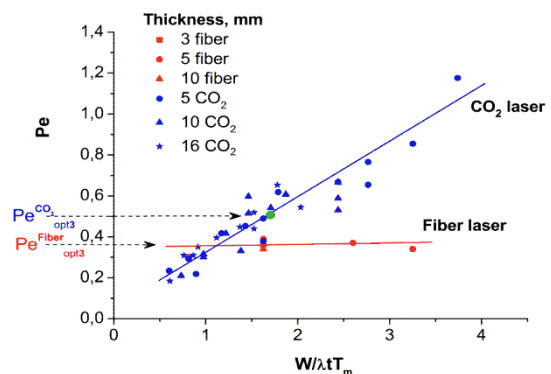


Рис.3.2.2. Данные, представленные на рис.3.2.1 для CO₂ лазера и данные для волоконного лазера в безразмерных переменных $Pe = Vb/\gamma$ - число Пекле, $Q_w = W/(\lambda t T_m)$

Каждая точка на рис. 3.2.1 и 3.2.2 соответствует минимуму R_z при последовательной оптимизации по скорости V_c и ширине реза b для заданной мощности излучения W . Результаты оптимизации, представленные в координатах $(V_c - W)$ (см. рис. 3.2.1), образуют некую довольно широкую область оптимальных параметров.

На рис. 3.2.2 . те же данные, а также данные для волоконного лазера представлены в координатах безразмерных переменных $Be_1 = \frac{W}{t\lambda_m T_m}$ и $Pe = \frac{V_c b \rho_m C_m}{\lambda_m}$,

Видно, что в безразмерных координатах все точки можно описать одной зависимостью. Важно, что эти условия не зависят от толщины разрезаемого листа и имеют одинаковый вид для лазеров с разной длиной волны – для волоконного и CO₂-лазера. Таким образом в рамках проекта экспериментально обосновано, что найденные определяющие параметры имеют фундаментальный характер и обуславливают качество лазерной резки не зависимо от вида лазера.

3.3 Найденны критериальные зависимости, определяющие качественный рез толстых (до 50 мм) стальных листов.

В проекте впервые показано, что уравнения баланса мощности для резки с кислородом (1) и нейтральным газом (2)

$$A \cdot W + W_{ox} = W_m + W_{cond} \quad (3.3.1)$$

$$A \cdot W = W_m + W_{cond} \quad (3.3.2)$$

где: A – интегральный коэффициент поглощения; W – мощность лазерного излучения; W_{ox} – мощность, выделяемая при окислении железа; W_m – мощность, затрачиваемая на плавление металла в зоне реза; W_{cond} – мощность, теряемая из зоны реза за счет теплопроводности и нагрева металла,

можно записать в обобщенном виде;

$$2(Q)_{кисл} \cong (Q)_{азот} = Pe \cdot \left(1 + \frac{L_f}{C_m \cdot \Delta T}\right) + 3.2\alpha(Pe/2)^{0.868}, \quad (3.3.3)$$

который уже не зависит от типа лазера и вида резки (с кислородом и технологическим газом). На рис. 3.3.1 приведены обобщенные экспериментальные результаты и теоретическая зависимость (3.3.3). Представленные данные показывают, что использование двух безразмерных энергетических параметров (безразмерной мощности $Q = A \cdot W / (\widetilde{\lambda}_m \cdot t \cdot T_m)$ и безразмерной скорости $Pe = \frac{V \cdot b}{\gamma}$) позволяет обобщить все многообразие экспериментальных данных в виде единой, близкой к линейной, зависимости $Q_{опт} \sim Pe_{опт}$. Постоянное значение коэффициента наклона этой зависимости $Q_{опт}/Pe_{опт} \approx const$ позволило определить энергетическое условие качественной резки..

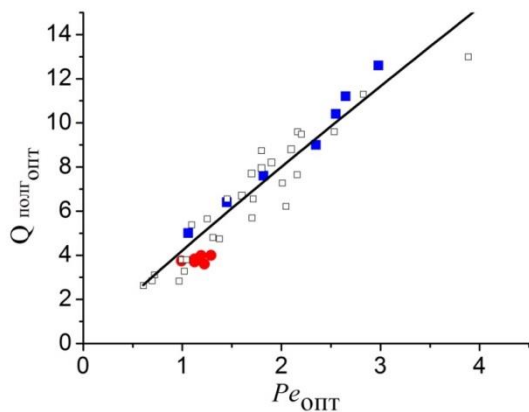


Рис.3.3.1. Обобщение экспериментальных результатов через безразмерные параметры $Q = A \cdot W / (\lambda \cdot t \cdot T_m)$ и $Pe = V_c \cdot b / \gamma$ полученные при высококачественной резке низкоуглеродистой стали волоконным лазером (точки 1) и CO₂-лазером (точки 3), а также нержавеющей стали волоконным лазером (точки 2). Сплошная линия построена по выражению (3.3.3)

Экспериментально установлено, что при лазерной резке стали минимум шероховатости достигается при вкладе полной энергии 24...28 Дж в 1 мм³ удаляемого из канала реза материала. Эта величина не зависит от длины волны излучения, типа материала и толщины разрезаемого листа. Причем, при резке с химически нейтральным газом весь вклад энергии обеспечивает лазерное излучение, а при лазерно-кислородной резке полный вклад есть сумма энергии излучения и экзотермической реакции окисления железа.

Таким образом, доказано, что состояние формируемой при лазерной резке поверхности, т.е. ее шероховатость, сводится к проблеме течения многофазной жидкости в узком канале при выделении лазерной энергии и химических реакциях.

3.4 Сформулированы оптимальные условия лазерной резки с минимизацией зоны термического влияния, т.е. термических напряжений и трещинообразования.

В результате обобщения большого числа экспериментальных данных по лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали, полученных по единой методике в широком диапазоне толщин разрезаемых листов (3...20 мм), найдены эмпирические закономерности и определены соотношения, дающие оптимальные условия резки (скорость резки, мощность излучения) с минимальной зоной термического влияния. Эксперименты проводились с использованием волоконного и CO₂-лазеров.

Найдены значения безразмерных переменных, дающие условия качественной лазерно-кислородной резки низкоуглеродистой стали для CO₂-лазера с длиной волны 10.6 мкм :

$$Pe_{opt} = V_{opt} b_{opt} / \gamma = 0.5, \quad Q_{wopt} = W_{opt} / (\lambda t T_m) = 1.6$$

и волоконного лазера с длиной волны 1.07 мкм:

$$Pe_{opt} = V_{opt} b_{opt} / \gamma = 0.35, \quad Q_{wopt} = W_{opt} / (\lambda t T_m) = 1.6 \dots 2.4$$

На рис.3.1.1 этим значениям соответствует минимум функционала $R_z/t = f(Pe, Q_w, b/t, A_i)$.

Кроме этого, впервые установлена практически единая зависимость оптимальной ширины реза от толщины разрезаемого металла для двух типов лазеров (рис.3.4.1).

Используя оптимальные значения безразмерных параметров и зависимости для ширины реза от толщины были найдены условия, определяющие изменение оптимальной скорости и лазерной мощности от толщины.

Эти соотношения представлены в таблице 3.4.1. Здесь V [мм/с] – скорость резки, W [Вт] – лазерная мощность, t [мм] – толщина разрезаемого листа.

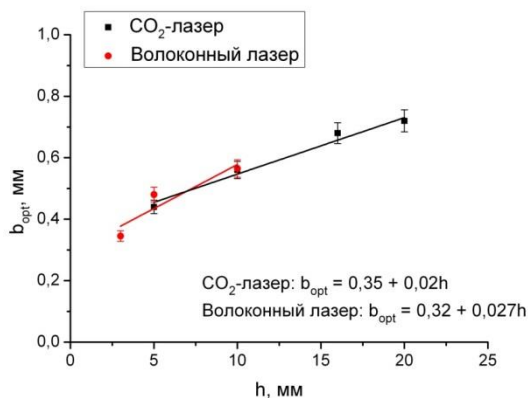


Рис. 3.4.1. Зависимость оптимальной ширины реза от толщины разрезаемого материала.

Таблице 3.4.1. Оптимальные соотношения скорости перемещения, мощности излучения, толщины разрезаемого материала.

CO ₂ -лазер	Волоконный лазер
$V = 11/(0.35 + 0.02t)$	$V = 7/(0.32 + 0.027t)$
$W/t = 200 \pm 20$	$W/t = 200...320$

П
ри
рез
ке

высоколегированной стали с инертным газом при толщинах листов 3...5 мм минимальная зона термического влияния достигается при максимальной скорости резки.

3.5 Созданы инженерные соотношения и рекомендации для условий лазерной резки стали большой толщины.

Предложен критерий определения предельной толщины листа при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучением CO₂-лазера. Предельная толщина определяется из условия $V_q = V_c$, где V_c скорость качественного реза, V_c - критическая скорость, ниже которой режим резки становится неустойчивым. Величины V_q , V_c и их зависимость от толщины определены экспериментально. Предельная толщина равна 40...50 мм. Начиная с толщин 30...40 мм целесообразно использовать кислородно-лазерную резку. Результаты представлены на рисунке, V_{qOL} – скорость качественного реза при кислородно-лазерной резке. При переходе на кислородно-лазерную резку при толщинах 30...40 мм не происходит ухудшения

качества реза. На рис 3.5.1 показана также зависимость от толщины лазерной мощности W_q , необходимой для качественной лазерно-кислородной резки.

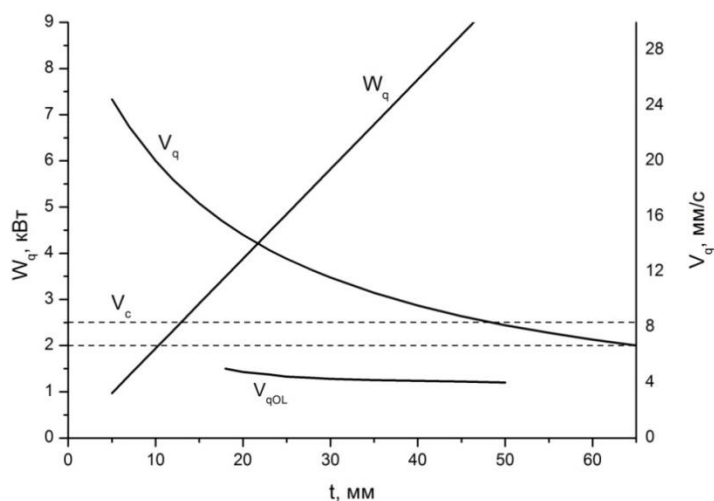


Рис.3.5.1 Технологическая карта по оптимальному выбору технологии лазерной резки толстых стальных листов.

3.6 Экспериментально исследованы механизмы воздействия импульсно – периодического излучения на сверхзвуковые потоки воздуха и связь параметров лазерного излучения со структурой теплового следа.

Модельный сверхзвуковой поток, создавался на специальном стенде, включающем форкамеру и коническое сопло. Давление в форкамере – 1,8 МПа. Коническое сопло с углом раскрытия 13° при диаметре среза 10 мм и диаметре критического сечения 8 мм соответствовало геометрическому числу Маха 1,9. (скорость газа около 500-600 м/сек). При этом расход газа составляет 2...4 кг/сек.

Фотография плазмы в сверхзвуковом потоке показана на рис.3.6.1

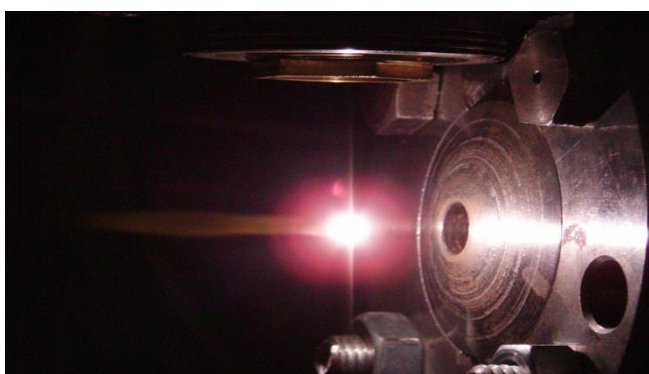


Рис.3.6.1 Фото плазмы в сверхзвуковом потоке.

Исследовалось взаимодействие плазменных областей, формируемых пульсирующим разрядом, со сверхзвуковым потоком воздуха. Структура сверхзвукового потока воздуха с оптиче-

ским пробоем при двух частотах следования импульсов излучения 60 и 150 кГц приведена на фотографиях (рис. 3.6.2 *а, б*).

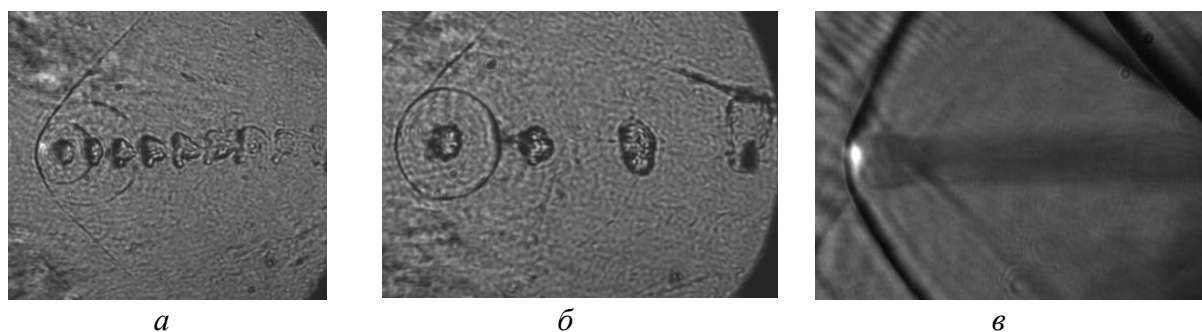


Рис.3.6.2 Структура ударных волн и теплового следа, формируемых в сверхзвуковом потоке.

Размер каверн слабо изменяется вниз по потоку, их свечение наблюдалось ранее. Каждый пробой газа генерирует ударную волну, которая достаточно быстро приобретает сферическую форму. Взаимодействие ударных волн с кавернами приводит к деформации каверн, которая усиливается по мере удаления от места пробоя газа, причем в большей степени при увеличении частоты следования лазерных импульсов (рис.3.6.2 *б*). В потоке также образуется инициированная плазмой головная ударная волна, как при обтекании твердого тела. Однако она формируется как результат объединения сферических волн. На снимках рис. 3.6.2 *а* и особенно рис. 3.6.2 *б* отчетливо видно, что головная ударная волна образуется суперпозицией последовательности ударных волн, генерируемых при каждом пробое газа.

Характерные временные и пространственные параметры скорости деградации областей низкой плотности зависят от частоты ОНР. Так, при частоте 150 кГц характерные масштабы существенной деформации составляют 33-50 мкс и 15-18 мм, тогда как при 60 кГц каверна сохраняется несколько дольше: около 50 мкс и распространяется до расстояний 22-25 мм. По видимому, большее количество ударных волн, проходящих сквозь каверны, усиление взаимодействия соседних каверн из-за уменьшения расстояний между ними способствуют более быстрому их разрушению при увеличении частоты ОНР. Результатом разрушения каверн является сформированный тепловой след.

Таким образом, в работе впервые детально исследована структура возмущений, формируемых в сверхзвуковом потоке воздуха оптическими разрядами, создаваемыми импульсно-периодическим CO_2 лазером мощностью до 4,2 кВт и частотой следования до 150 кГц. Показано формирование стационарной головной ударной волны и установлены характерные пространственные и временные масштабы разрушения областей горячей плазмы низкой плотности (каверн).

3.7 Сформулированы основные закономерности эффективности передачи энергии лазерного излучения в сверхзвуковые потоки воздуха, стабильности зажигания и поддержания ОПР и связи этих параметров с характеристиками потока и структурой теплового следа.

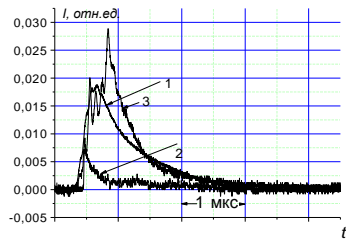
Результаты исследования образования плазмы, создаваемые на частотах f , равных 7 и 70 кГц для двух дисков с 40 и 400 количеством щелей при наличии сверхзвукового потока воздуха, приведены на рис. 7.1

Представлены два случая: без потока воздуха в покоящемся газе (А,Б) и в сверхзвуковом потоке воздуха (В,Г). Цифрами 1 на рисунках обозначены осциллограммы падающего излучения, т.е. осциллограммы генерации лазера, 2 – излучение, прошедшее через плазму и 3- свечение плазмы.

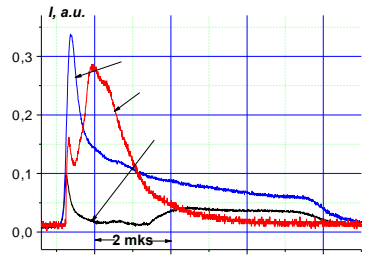
Из рис.3.7.1 (Б,Г) следует, что при $f=7$ кГц не зависимо от наличия сверхзвукового потока воздуха существует характерное время порядка 1.5 - 2 мкс (при полной длительности импульса 7.5 мкс), в течение которого наблюдается сильное свечение плазмы и максимальное поглощение, т.е. интенсивность прошедшего через плазму излучения минимальна. Затем характер взаимодействия лазерного излучения с плазмой изменяется, прошедшая интенсивность лазерного излучения резко возростала в несколько раз, наблюдались ее колебания в течение всего плато квазистационарной генерации. Свечение плазмы, максимальное при сильном поглощении, затем монотонно затухало. При выключении потока, т.е. в покоящемся воздухе, процесс взаимодействия практически не изменялся.

Сверхзвуковое движение воздуха приводило в срыву стабильности зажигания ОПР, наблюдались пропуски, различие в интенсивности свечения. Среднее поглощение лазерной мощности при создании плазмы с частотой импульсов 7 кГц в потоке было относительно меньшим, около 30-40 % . Для сравнения в покоящемся газе при этом же режиме генерации поглощение достигает 59 %.

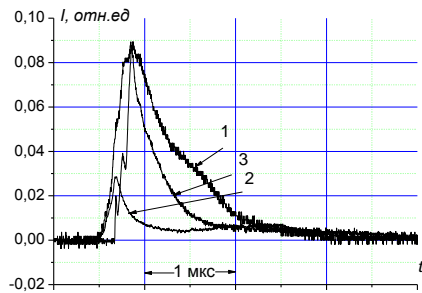
При использовании короткого импульса длительностью около 2 мкс (см.рис 3.7.1 (А,В)) наблюдается активное поглощение в течении 1.5-2 мкс, т.е. в практически в течении всей длительности импульса. Аналогичная ситуация наблюдается для данного импульса и в отсутствии потока.



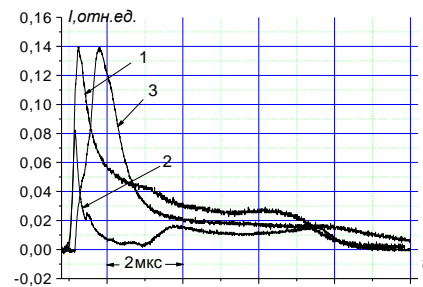
А) Диск – 400 щелей, 70,4 кГц



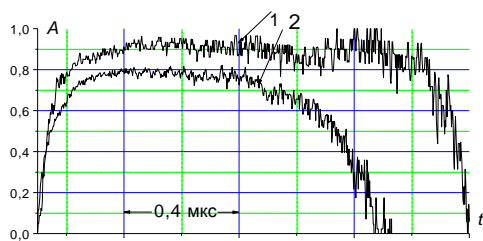
Б) 40 щелей, 7,04 кГц



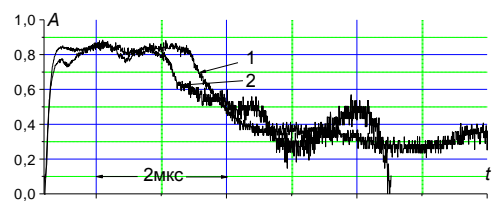
В) Диск – 400 щелей, 70,4 кГц



Г) 40 щелей, 7,04 кГц



Д) Диск – 400 щелей, 70,4 кГц



Е) 40 щелей, 7,04 кГц

Рис. 3.7.1 Осциллограммы падающего (1), прошедшего (2) лазерного излучения и свечения плазмы (3) без потока воздуха (А,Б,) и в сверхзвуковом потоке воздуха (В,Г,) а также зависимость поглощения от времени для условий: 1-с потоком, 2-без потока (Д,Е))

Таким образом, впервые исследовано влияние параметров импульса излучения на получение и устойчивое горение ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха и изучена эффективность поглощения энергии лазерного излучения в плазме.

1. Показана возможность поглощения 60-70% энергии лазерного излучения при условии согласования длительности импульса и времени развития волны ионизации, на фронте которой реализуется сильное поглощение.

2. Исследовано влияние скорости воздуха на стабильность зажигания плазмы. Показано, что стабильное горение ОПР в сверхзвуковом потоке реализуется при высокой частоте следования импульсом, когда интервал времени между импульсами излучения меньше времени сдува плазмы.

3. Исследование мгновенного значения коэффициента поглощения показало, что после пробоя за время порядка 100-150 нсек, формируется квазистационарная фаза длительностью около 1.5 мкс, существование которой не зависит от наличия потока воздуха и частоты следования импульсов излучения. Данная фаза сильного поглощения, по-видимому, связана с развитием волны ионизации.

4. После завершения волны ионизации поглощение пучка лазерного излучения распадающейся плазмой резко ослабевает.

3.8 Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с квазистационарными параметрами потока в тепловом следе, определенными на основе приближенных аналитических моделей. Особое внимание будет уделено анализу перехода от нестационарных процессов к квазистационарному режиму течения.

Получено экспериментальное подтверждение применимости теории точечного взрыва с противодавлением для определения волновой структуры и характерных пространственно-временных масштабов теплового следа за оптическим пульсирующим разрядом при точечной фокусировке излучения CO₂-лазера в сверхзвуковом потоке воздуха.

Сущность метода основана на использовании уникального импульсно-периодического CO₂ лазерного комплекса, созданного в ИТПМ СО РАН, работающего на частотах до 150 кГц.

Получен количественный критерий квазиоднородности теплового следа для частоты следования импульсов лазерного излучения в виде $f \sim V^{3/2}(p/P)^{1/2}$ (где V – скорость потока, p – давление воздуха, P – мощность поглощенного излучения CO₂-лазера). Открывается перспективу управления сверхзвуковыми течениями.

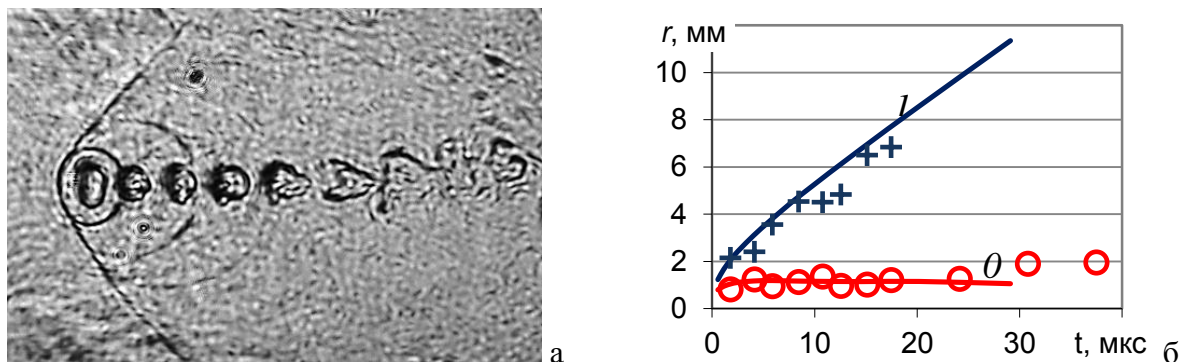


Рис. 3.8.1 Структура ударных волн и теплового следа в сверхзвуковом потоке воздуха *а* – шпирен - фотографии структуры течения, *б* – изменение радиуса от времени после разряда; *0* – область низкой плотности, *1* – ударная волна

4. Заключение

Краткие выводы по результатам НИР в целом;

1. Разработаны новые физические модели взаимодействия излучения с веществом с учетом качества лазерного пучка и качества газового потока.

2. Определены безразмерные параметры и законы подобия, определяющие свойства лазерной резки металлов.

3. Найдены критериальные зависимости, определяющие качественный рез толстых (до 50 мм) стальных листов.

4. Сформулированы оптимальные условия лазерной резки с минимизацией зоны термического влияния, т.е. термических напряжений и трещинообразования.

5. Созданы инженерные соотношения и рекомендации для условий лазерной резки стали большой толщины.

6. Экспериментально исследованы механизмы воздействия импульсно – периодического излучения на сверхзвуковые потоки воздуха и связь параметров лазерного излучения со структурой теплового следа.

7. Сформулированы основные закономерности эффективности передачи энергии лазерного излучения в сверхзвуковые потоки воздуха, стабильности зажигания и поддержания ОПР и связи этих параметров с характеристиками потока и структурой теплового следа.

8. Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с квазистационарными параметрами потока в тепловом следе, определенными на основе приближенных аналитических моделей. Особое внимание будет уделено анализу перехода от нестационарных процессов к квазистационарному режиму течения

Оценка полноты решений поставленных задач по НИР в целом, рекомендации по конкретному использованию результатов НИР.

Цели проекта достигнуты, и предполагаемые результаты получены полностью.

Фундаментальные результаты НИР могут быть использованы:

- Созданная физическая модель и найденные законы подобия могут быть использованы для тестирования численных моделей лазерной резки;
- Развитое направление лазерной металлургии, разработанные методы по лазерной наплавке которые открывают перспективу создания методов получения гетерогенного материала с заданной микроструктурой и необходимыми механическими свойствами.
- Разработанные условия передачи энергии в сверхзвуковой поток воздуха, которые позволят создать методы управления параметрами высокоскоростными потоками в аэродинамическом эксперименте.

Прикладные результаты НИР, открывают возможности по созданию новых высокотехнологичны промышленных технологий:

- Создание технологических карт высококачественной лазерной резки металлов и методов модернизации современных лазерных установок с целью достижения максимальной производительности и эффективности их работы.
- Разрабатываемая технология лазерной сварки сплавов авиационного назначения впервые в мире открывает перспективу создания технологии сварки корпусов широкофюзеляжных самолетов.
- Созданные методы образования плазменных облаков в сверхзвуковом потоке, методы могут использоваться для решения задач плазменной химии, а также решить проблему «Звукового удара».

Данные результаты могут быть востребованы в корпорациях Trumpf и IPG при создании автоматизированных лазерных комплексов для промышленности. Результаты по сварке могут быть востребованы в ПАО «ОАК» ,Публичное акционерное общество «Объединённая авиастроительная корпорация».

Основные результаты НИР не имеют мировых аналогов и по уровню, существенно превышают Мировой.

5. Список используемой литературы.

1. Е.Н. Каблов Авиационные материалы и технологии. **1** (34), 3–33 (2015).

2. Petrovic M., Veljic D., Rakin M., Radovic N., Sedmak A., Bajic N. Friction-stir welding of highstrength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage //Materials in technology. 2012. V. 46. №3. P. 215–221.
3. Овчинников В.В., Грушко О.Е., Алексеев В.В., Магнитов В.С., Егоров Р.В. Структура и свойства сварных соединений алюминиевого сплава В-1469, полученных электронно-лучевой сваркой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №5 С.7-11
4. H. Sidhara, N. Y. Martineza, R. S. Mishraa, J. Silvanus Materials & Design 106, 146–152 (2016).
5. Ю.Ю. Клочкова, Г.Г. Клочков, В.А. Романенко, В.И. Попов Структура и свойства листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469» // «Авиационные материалы и технологии». 2015. № 4. С. 3-8;
6. M. Zhong, W. Liu, K. Yao, J.C. Goussain, C. Mayer, A. Becker, Microstructural evolution in high power laser cladding of Stellite 6+WC layers, Surf. Coat. Technol. 157 (2002) 128-137.
7. P. Wu, C. Z. Zhou and X. N. Tang: ‘Microstructural characterization and wear behavior of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings’, Surf. Coat. Technol., 2003, 166, (1),84–88.
8. K. Van Acker, D. Vanhoyweghen, R. Persoons, J. Vangrunderbeek, Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings, Wear 258 (2005) 194-202. 13 36
9. T. E. Abioye, J. Folkes¹, A. T. Clare and D. G. McCartney Concurrent Inconel 625 wire and WC powder laser cladding: process stability and microstructural characterization Surface Engineering, 2013 **29** (9), 647-6534. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., Liu Z.-D., Sun H.-G.,
10. Yan P.-Ch. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding. Surface and Coatings Technology, 2014, vol. 244, pp. 203–209.
11. Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Оришич А.М., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н., Филев В.Ф., Фомин В.М., Фомичев В.П. «Кризис расхода в диаметральном дисковых вентиляторах при низком давлении». Доклады Академии Наук, т.411 №2, 2006г, стр.186-189.

6. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием».

Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.) (единиц) **Задание на 2016 г.- 5, Реально – 6+1**

Публикации

1. Б.Д. Аннин, В.М. Фомин, Е.В. Карпов, А.Г. Маликов, А.М. Оришич. / Комплексное исследование лазерной сварки высокопрочного сплава в-1469 // Авиационные материалы и технологии 2016. №3. С. 9-16
2. А.М. Orishich, A.G. Malikov, V.D. Shelyagin, V.Yu. Khaskin & A.A. Chayka / Optimisation of the processes of laser, microplasma and hybrid laser–microplasma welding of aluminium alloys.// Welding International, 2016 V. 30 № 12, P. 957–961
3. А.М. Orishich, V.B. Shulyatyev, A.E. Filon. /Craterlike structures on the cut surface after oxygen-assisted laser cutting of steel.// Journal of Laser Applications. 2016, vol. 28, No 1, p. 012007.
4. А.А. Гольшев, А.М. Оришич, В.Б. Шулятьев. Оптимальный выбор технологии лазерной резки толстых стальных листов. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2016, вып. 3(72), с. 17-22.
5. А.А. Гольшев Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // Обработка металлов. -2016. -70(1), -С. 16-21.
6. Н.А. Маслов., Е.О. Папаева Статистический анализ матриц возбуждения-эмиссии для метода лазерно-индуцированной флуоресценции // Письма в журнал технической физики. – 2016. - № 14. - С 7 – 13.

Патент

Заявка на изобретение №2016122850/05. Способ выделения растворённых газов из жидкости и устройство для его реализации (Варианты). Фомин В.М., Фомичёв В.П., Приходько Ю.М., Чехов В.П. Приоритет 08.06.2016.

Общее количество публикаций за весь период выполнения проекта

Таб.4.1 Количество публикаций за весь период выполнения проекта.

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	26	6	6	8	6
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	18	3	6	6	3
Число тезисов в конференциях	52	11	12	20	9
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности	1	0	0	0	1
Количество научных сотрудников	16				

Копия плана НИР по данной теме-проекту

<p>Пункт программы ФНИ государственных академий наук на 2013-2020 годы и наименование направления иссле- дований</p>	<p>Содержание работы</p>	<p>Планируемый результат вы- полнения работы, подразделение научного учреждения РАН и руководитель работы</p>
<p>18. Физико-технические и экологические проблемы энергетики, теплообмен, теплофизические и электрофизические свойства веществ, низкотемпературная плазма и технологии на ее основе. "Разработка физических основ теории взаимодействия лазерного излучения с веществом для создания новых высокоэффективных технологий. Номер госрегистрации: 01201351881" (№ 0323-2014-0002</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разработка методов улучшения физико-механических характеристик лазерных сварных соединений высоколегированных алюминиевых сплавов, с применением термической и механической обработкой сварных соединений. 2. Создание металлокерамических композиций с высокими механическими характеристиками на основе аддитивных технологий. 3. Экспериментальное исследование характеристик и их зависимости, нового типа неоднородностей на поверхности лазерного реза в виде кратеров, от параметров резки. 4. Исследование влияния состояния поляризации излучения на характеристики реза при лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали CO₂-лазером. 5. Исследование возможности восстановления спектров возбуждения и флуоресценции отдельных флуорофоров по статистике спектров оптических фантомов структурно сложных объектов при мультиволновом возбуждении. 6. Вычислительное и экспериментальное исследование возможности использования диаметального дискового вентилятора для транспортировки и охлаждения газа в газодинамическом контуре CO₂-лазера. 7. Анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами в зависимости от относительной скорости движения поверхностей. Определение влияния успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал. 	<p>Лаб. 3 «Лазерные технологии», Лаб.4 «Физика быстропротекающих процессов», МЦАИ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Будет установлено влияние термической и деформационной обработки, применяемой к сварному соединению на механические свойства сварных соединений. 2. Будет получен гетерогенный материал на основе керамики WC с малым абразивным износом. 3. Будет выявлено влияние параметров лазерной резки на структуру и размер неоднородностей в виде кратеров 4. Будет определено влияние линейной поляризации излучения на качество поверхности реза. 5. Будет выяснена возможность определения свойств неизвестных флуорофоров присутствующих в структурно сложных объектах, что может быть использовано, например, для лазерной медицинской флуоресцентной диагностики. 6. Будут установлены механизмы формирования потока газа с помощью дискового вентилятора в контуре газодинамического CO₂-лазера. 7. Будет проведен анализ отличий профилей средней скорости в течении Куэтта по длине полукольцевого канала

		<p>от теоретического линейного для плоского течения Куэтта между бесконечными пластинами. Будет определено влияние успокоительной камеры на снижение уровня пульсаций на входе в полукольцевой канал.</p>
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------