

На правах рукописи

УДК 621.373.826

Крючина Ольга Алексеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ ЛАЗЕРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва 2025

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

ШИГАНОВ Игорь Николаевич

доктор технических наук, профессор

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Официальные оппоненты:

Низьев Владимир Григорьевич

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории лазерных термических технологий Отделения «Институт проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) – Шатура» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Петровский Виктор Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, Руководитель Лазерного центра Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «___» 2025 г. в _____

на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автограферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1 и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33*35-58

Автограферат разослан: «___» 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Лазерные технологии обработки материалов являются научёмыми, высокотехнологичными и относительно опасными процессами. Технологическая среда, в которых они выполняются, весьма разнообразна и многофакторна. Понятие технологической среды оптического спектра (ТСОС), сформулированное в настоящей работе, объединяет совокупность факторов электромагнитного излучения в зоне обработки, сопутствующих лазерным технологическим процессам (ЛТП), влияющих как на их течение, так и на персонал, участвующий в их реализации.

В нормативной документации по лазерной безопасности учитывается только воздействие лазерного излучения (ЛИ) различных длин волн от 180 до 10^6 нм. Однако, в случае применения ЛИ для технологических процессов при взаимодействии ЛИ с материалами, помимо отраженного и прямого ЛИ, возникают сопутствующие излучения (СИ) от образующегося паро-плазменного факела, происходит свечение нагретого материала и разлетающихся искр от металлических частиц. В зависимости от конкретной технологии и обрабатываемого материала, ТСОС имеет различные как по спектральному, так и по энергетическому составу характеристики.

Проведение измерений энергетических характеристик лазерного и сопутствующего излучений, обоснование и оценка критериев взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами позволит исследовать ТСОС функционирования лазерных комплексов для различных технологических процессов, разработать технические требования к оформлению конструктивных элементов защитных устройств оборудования, внести поправки в действующую нормативную документацию по лазерной тематике с учётом новейших разработок в области лазерных технологий. В настоящее время подобные критерии не сформулированы ни в технической, ни в нормативной документа-

ции на лазерное технологическое оборудование. Отсутствие подобных критериев сдерживает широкое внедрение лазерных технологических комплексов в различные отрасли промышленности. В связи с этим тема диссертационной работы является весьма актуальной.

Цель работы – определение спектральных диапазонов, интенсивности излучения и их роли в формировании ТСОС при выполнении основных технологических процессов лазерной обработки различных металлических материалов (металлов и сплавов).

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

- анализ особенностей, происходящих в процессе взаимодействия ЛИ с материалами;
- теоретическое и экспериментальное определение спектральных характеристик ТСОС функционирования лазерных установок для различных процессов обработки материалов;
- разработка теоретической модели оценки составляющих отражённого ЛИ в технологических процессах обработки материалов;
- создание специализированного стенда для одновременной фиксации энергетических характеристик всего волнового диапазона оптического спектра при лазерных технологических процессах обработки металлов и сплавов;
- разработка и апробация экспериментальных методик измерения для исследования и оценки параметров отражённого и рассеянного ЛИ, сопутствующего ультрафиолетового (УФ-), видимого и инфракрасного (ИК-) излучения при ЛТП обработки металлов и сплавов;
- измерения энергетических характеристик отражённого и рассеянного ЛИ и сопутствующего УФ-излучения;
- разработка рекомендаций по применению средств защиты от лазерного и сопутствующего излучения при лазерной обработке металлов и сплавов, а также внесение их в техническую и нормативную документацию (руководства по эксплуатации, стандарты организации, национальные стандарты).

Научная новизна

1. Разработана и апробирована в промышленных условиях экспериментально-теоретическая методика оценки ТСОС в процессе лазерной обработки металлов и сплавов, позволяющая оперативно определять спектральный состав возникающего СИ.
2. Впервые установлено процентное соотношение спектральных диапазонов СИ, зависящих от химического состава обрабатываемого материала и режимов работы лазерного оборудования, которое составляет для полученных экспериментальных данных: УФ-излучение (300-380 нм) $\approx 9\text{-}16\%$, излучение видимого спектра (380-740 нм) $\approx 47\text{-}54\%$ и ИК-излучение ближнего диапазона (740-900 нм) $\approx 31\text{-}41\%$.

3. Экспериментально установлены уровни энергетической освещённости от УФ-излучения, превышающие предельно допустимую интенсивность (ПДИ) от 1,2 до 4000 раз, уровни облучённости от ЛИ, превышающие предельно допустимые уровни (ПДУ) для глаз от 1,2 до 15,7 раз в зависимости от процесса при обработке сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

Практическая значимость

1. Разработан стенд для оперативной комплексной фиксации энергетических характеристик УФ-, видимого, и ИК- излучений, составляющих ТСОС при различных лазерных процессах обработки металлов и сплавов.
2. Доказано, что при ЛТП обработки металлов и сплавов, помимо защиты от отражённого ЛИ, предусмотренного действующей нормативной документацией, необходимо использовать средства защиты от других видов СИ.
3. Предложены комплексные средства защиты операторов от излучений, вызываемых воздействием мощного ЛИ на металлы и сплавы при различных ЛТП.
4. Впервые в отечественной практике внесены положения в нормативную документацию по категорированию лазерного оборудования, классифи-

кации средств коллективной защиты, требования безопасности для ручных систем и др. Разработан ГОСТ Р 71028-2023 «Оптика и фотоника. Оборудование на базе волоконных лазеров. Требования безопасности».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. ТСОС каждого конкретного ЛТП обработки определённого материала имеет свой уникальный спектральный состав.

2. В ЛТП обработки алюминиевого сплава АМг6, титанового сплава ВТ6, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и стали 09Г2С в состав ТСОС входит УФ-излучение, имеющее в ряде случаев интенсивность, превышающую ПДИ на рабочих местах в соответствии с санитарными нормами и правилами (Сан-ПиН).

3. Уровни облучённости отражённого ЛИ в ЛТП не обладают прямопропорциональной зависимостью от выходной мощности ЛИ.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием общих положений фундаментальных наук, проверена по известным критериям изучаемых процессов, достаточным количеством экспериментальных данных, использованием современного поверенного и откалиброванного измерительного оборудования, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Апробация работы

XXXI Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» 28-30 октября 2020 г.; XIV Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» 21-24 сентября 2021 г.; Заседание технического комитета по стандартизации ТК-296 «Оптика и фотоника» в рамках «20-й Международной конференции по оптике лазеров ISLO-2022» 20-24 июня 2022 г.; Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы повышения эффективности сварочного производства – 2023» в рамках конгрессной программы выставки «Сварка/Welding» 18-20 апреля 2023 г.; XI международная конференция «Лучевые технологии и

применение лазеров 2024 – Beam technologies and laser application 2024» 22-25 сентября 2024 г. Всего 20 научно-практических, всероссийских, международных и др. конференций.

Публикации

По материалам диссертации выпущено 18 научных публикаций, в том числе 7 статей в журналах из перечня ВАК РФ и входящих в базы данных Scopus, 6 тезисов докладов в сборниках трудов международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы, 1 приложения. Диссертация изложена на 164 страницах, содержит 27 таблиц, 67 рисунков. Список использованной литературы содержит 149 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы.

В первой главе на основе литературных данных проведён обзор наиболее востребованных в настоящее время лазерных технологий, используемых материалов и областей их применения, рассмотрены конструктивные особенности лазерного технологического оборудования, применяемого для реализации лазерных технологий. В настоящей работе в качестве исследуемых технологий выбраны широко используемые в промышленности технологии лазерной сварки, маркировки, очистки, гибридной лазерно-дуговой сварки, в качестве основных материалов для проведения исследований рассматриваются: сталь 09Г2С, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав АМг6, титановый сплав ВТ6.

Представлено оборудование на основе применения волоконных лазеров для осуществления этих процессов, с указанием конструктивных особенностей защитных устройств.

Введено понятие ТСОС, в которой осуществляется лазерная обработка материалов. В частности, описаны параметры ТСОС и методы её оценки, представленные на Рисунке 1.



Рисунок 1. Схема описания и оценки ТСОС

Под термином «технологическая среда оптического спектра» понимается совокупность таких факторов, как отражённое и рассеянное ЛИ, СИ от паро-плазменного факела и обрабатываемого материала, возникающих во время ЛТП, которые влияют как на течение самого процесса, так и на персонал. Описаны качественные и количественные методики оценки параметров ТСОС.

В результате анализа литературных источников сформулированы задачи исследований.

Во второй главе на основе схемы энергозатрат в установившемся режиме проплавления металла сфокусированным ЛИ и схемы взаимодействия лазерного луча с обрабатываемым материалом в процессе сварки с глубоким проплавлением (Рисунок 2) составлена математическая модель и проведён расчёт интенсивностей отражённого и рассеянного ЛИ для нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Значения, полученные в результате расчётов (для выходной мощности 7000 Вт, расстояния до зоны обработки 1000 мм):

$$I_3 = 4,79 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad \text{– интенсивность зеркально-отражённого ЛИ}$$

$$I_{\text{дк}} = 2,47 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad \text{– интенсивность ЛИ, отражённого от дна паро-газового канала}$$

$$I_p = 5,98 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad - \text{интенсивность рассеянного ЛИ}$$

$$I_{\Sigma \text{теор}} = 6,01 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad - \text{суммарная интенсивность}$$

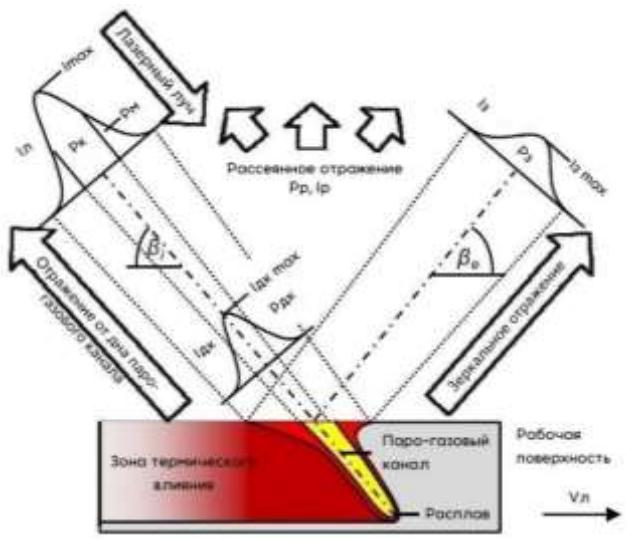


Рисунок 2. Схема расчётной модели взаимодействия лазерного луча с обрабатываемым материалом в процессе сварки с глубоким проплавлением

Расчётная схема (Рисунок 2) не учитывает процессы, порождающие СИ. При высоких значениях плотности мощности ЛИ, используемого в технологиях обработки материалов, в защитных газах или в воздухе возникает ярко светящийся паро-плазменный факел, который рассматривается как низкотемпературная плазма. Паро-плазменный факел испускает СИ различных длин волн от УФ- до ИК-диапазона и вносит дополнительные аспекты в технологический процесс.

При помощи компьютерного моделирования спектров эмиссии плазмы установлено, что в зависимости от рассматриваемого материала спектр имеет различный состав и интенсивность линий. Поскольку ЛТП являются нестационарными, то в один и тот же момент времени обрабатываемый материал может находиться в разных агрегатных состояниях и, соответственно, иметь разную температуру в разных зонах. Моделирование показало, что по мере увеличения температуры увеличивается количество и интенсивность спектральных линий эмиссии плазмы в УФ-области, причём при температуре порядка

15000 К спектр полностью смещается в УФ-область. По мере увеличения температуры увеличивается количество и интенсивность спектральных линий эмиссии плазмы в УФ-области, причём во всех диапазонах УФ-спектра (УФ-А, УФ-В, УФ-С). Полученные данные подтверждают необходимость количественного исследования ТСОС в УФ-диапазоне длин волн.

В третьей главе приведено описание функционирования используемого в настоящей работе оборудования, методики и схемы измерений при проведении исследований.

Для определения спектрального состава ТСОС выбран метод оптической спектроскопии, в основе которого лежит исследование излучения паров металла. Переход исследуемого металла в парообразное состояние достигается действием концентрированного ЛИ. Данный метод наиболее простой и доступный для проведения спектрального анализа во время ЛТП. Измерения спектрального состава проводились на автоматизированном монохроматоре/спектрографе M266 фирмы SOLAR при осуществлении технологического процесса лазерной маркировки на экспериментальной установке на базе волоконного лазера, мощность выходного излучения которого составляла 100 Вт, длина волны 1070 нм.

Для количественного исследования свойств ТСОС предлагается принципиально новый, отличный от существующих, метод определения световых параметров технологической среды. Данный метод основан на измерении энергетических параметров отражённого и рассеянного ЛИ и СИ с использованием стенда, оснащённого приборами, в соответствии с областью применения. Для определения характеристик в УФ-диапазоне длин волн используются УФ-радиометры типа АРГУС, в ИК-диапазоне на рабочей длине волны 1070 нм – лазерный дозиметр «ЛД-07», которые позволяют определить энергетическую освещённость УФ-А, УФ-В и УФ-С излучения и облучённость от ЛИ, соответственно. Для комплексных измерений был сконструирован и изготовлен специализированный стенд, показанный на Рисунке 3, используемый для лабораторных исследований и промышленных испытаний.



Рисунок 3. Стенд измерения энергетических характеристик отражённого излучения

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведённых в рамках диссертационной работы. Положение точек контроля выбраны в зоне наиболее вероятного нахождения оператора или персонала на расстоянии ≈ 1000 мм до зоны обработки на высоте от пола, соответствующей среднестатистическому уровню глаз человека ≈ 1350 мм в позиции стоя.

С учётом возможностей монохроматора/спектрографа, установлено, что от общей интенсивности ТСОС УФ-излучение (300-380 нм) составляет $\approx 9\text{-}16\%$, излучение видимого спектра (380-740 нм) $\approx 47\text{-}54\%$ и ИК-излучение ближнего диапазона (740-900 нм) $\approx 31\text{-}41\%$ для всех рассмотренных ЛТП.

Состав ТСОС при ЛТП получен впервые экспериментально приборным методом в процентном соотношении и даёт возможность судить о видах СИ, которые, в том числе, могут оказывать неблагоприятное влияние на оператора. Подобные сведения отсутствуют в нормативной документации по использованию лазеров и лазерных комплексов.

На Рисунке 4 показаны спектры лазерной плазмы образцов исследуемых материалов в наложении друг на друга. По оси ординат указано число отсчетов фотоумножителя, которое пропорционально относительной интенсивности, а по оси абсцисс длина волны излучения. Из рисунка 4 видно, что самый интенсивный спектр зафиксирован при обработке титанового сплава ВТ6. Спектры плазмы образцов сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т по многим линиям совпадают. Спектр плазмы образца алюминиевого сплава АМг6 имеет наименьшую относительную интенсивность по сравнению с остальными. Экспериментально было установлено, что плазма, возникающая от воздействия ЛИ на обрабатываемый материал, создаёт спектр излучения, образованный многочисленными полосами, которые располагаются в УФ-, видимой и ИК- областях спектра.

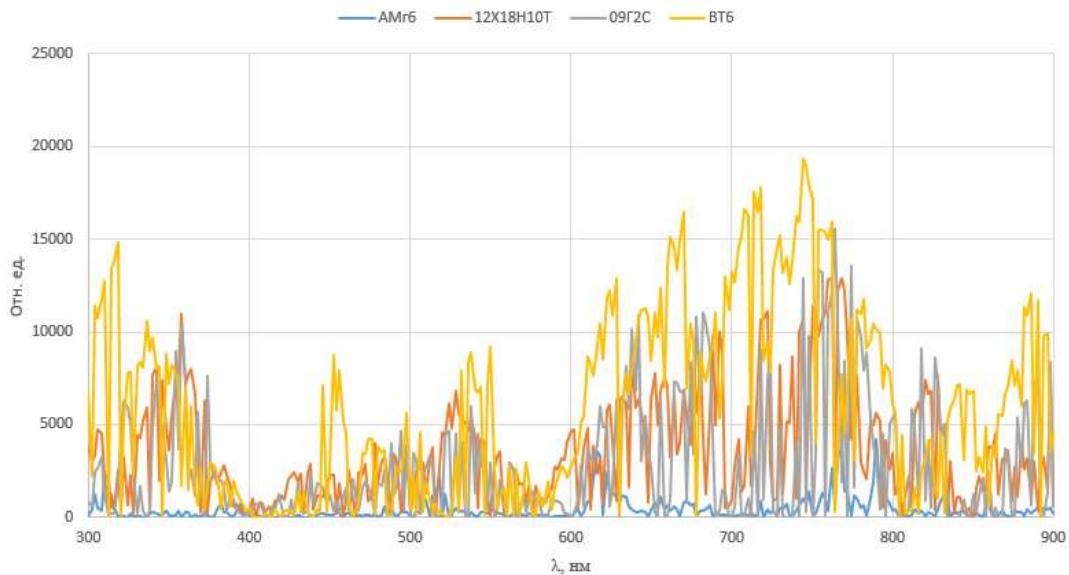


Рисунок 4. Спектры лазерной плазмы образцов исследуемых материалов

Отличие значений теоретических расчётов и экспериментальных результатов облучённости от ЛИ для процесса лазерной сварки с глубоким проплавлением нержавеющей стали 12Х18Н10Т связана с наличием паро-плазменного факела, который не учитывается в расчётной части. В зависимости от параметров процесса и обрабатываемого материала, факел может поглощать часть отражённого излучения, полностью препятствовать его выходу за свои пределы или вносить дополнительную энергию в интенсивность излучения ИК-диапазона.

В полученных результатах прослеживаются различия уровней облучённости от ЛИ при технологиях лазерной очистки, маркировки, роботизированной и ручной сварки, причём самый высокий уровень зафиксирован при ручной сварке алюминиевого сплава типа АМг6. Для нержавеющей стали 12Х18Н10Т наибольшая интенсивность установлена при технологии лазерной маркировки (Рисунок 5), что неочевидно, поскольку данная технология по мощности излучения менее энергозатратная по сравнению со сваркой. Из этого сделан вывод, что облучённость от ЛИ не имеет прямо пропорциональную зависимость от выходной мощности ЛИ.



Рисунок 5. Графики уровней максимальной облучённости от ЛИ при различных технологических процессах обработки нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т

Одну из ключевых ролей в формировании ТСОС играет плотность мощности ЛИ. Значения плотности мощности при лазерной маркировке, очистке и при ручной сварке находятся в диапазоне $1,6-7,9 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$. Именно поэтому в технологических процессах с разными выходными мощностями значения облучённости находятся наравне. Для оценки влияния плотности мощности проведён специальный эксперимент при роботизированной сварке. Был преднамеренно увеличен диаметр пятна ЛИ, что привело к уменьшению плотности мощности, по сравнению с остальными процессами на два порядка ($5 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$), при этом зафиксированы значения облучённости на порядок

ниже, чем во всех остальных исследуемых процессах. Результат этого эксперимента убедительно доказал влияние плотности мощности ЛИ на показания облучённости от ЛИ.

Ещё одной особенностью сравнения ТСОС при разных ЛТП является паро-плазменный факел. Процесс лазерной маркировки носит поверхностный характер обработки, что обуславливает отсутствие интенсивного паро-плазменного факела и способствует наиболее активному отражению ЛИ. В процессе лазерной сварки при уменьшении плотности мощности возникает интенсивный паро-плазменный факел, который концентрирует в себе ЛИ, поэтому активного отражения ЛИ не происходит.

Проведено сравнение уровней УФ-излучения в процессах лазерной сварки и лазерно-дуговой сварки стали типа 09Г2С (Рисунок 6). Наибольшие значения, со значительным превышением ПДИ для УФ-В излучения, были зафиксированы при гибридной лазерно-дуговой сварке. На графиках наглядно видна значительная разница в уровнях энергетической освещённости для лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки, поскольку дуга вносит большой вклад в интенсивности УФ-излучения ТСОС.

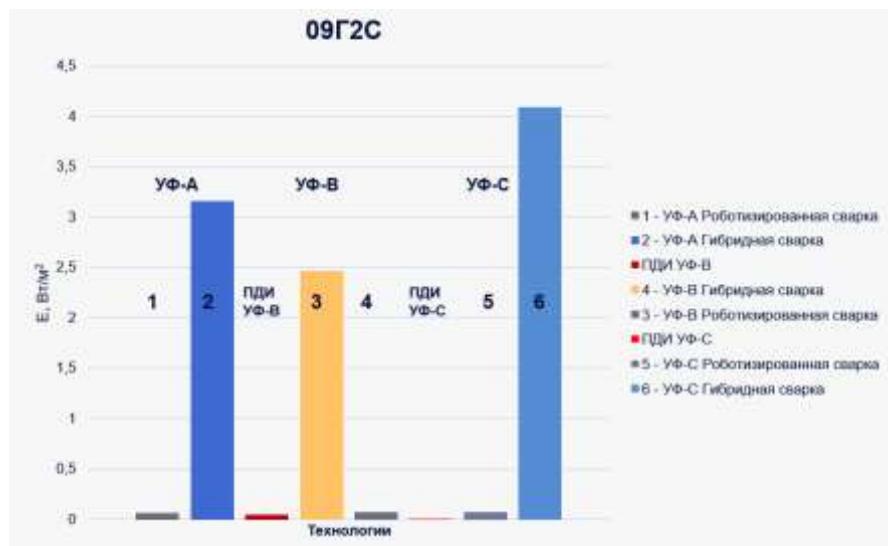


Рисунок 6. Графики уровней энергетической освещенности УФ-А и УФ-В излучения при лазерной и гибридной лазерно-дуговой обработке образцов из стали типа 09Г2С толщиной 16 мм

Для титанового сплава ВТ6 в исследуемых процессах получены интенсивности энергетической освещённости, превышающие ПДИ, причём значения близки к результатам, полученным при гибридном лазерно-дуговом процессе (Рисунок 6). То есть интенсивность УФ-излучения при обработке титанового сплава можно сопоставить с интенсивностью, которую вносит в процесс электрическая дуга при гибридной лазерно-дуговой сварке.

При обработке алюминиевого сплава АМг6 и титанового сплава ВТ6 для ручной и роботизированной сварки, а также при роботизированной сварке нержавеющей стали 12Х18Н10Т зафиксированы уровни УФ-В излучения, превышающие ПДИ. Уровни УФ-С излучения, превышающие ПДИ, зафиксированы во всех исследуемых технологических процессах. Этот факт обуславливает необходимость обязательного применения средств защиты не только от ЛИ, но также и от УФ- излучения во всех технологических процессах обработки металлических материалов.

В пятой главе приведены данные практического применения результатов исследования ТСОС. Был разработан и с 1 марта 2024 года вступил в силу национальный стандарт ГОСТ Р 71028-2023 «Оптика и фотоника. Оборудование на базе волоконных лазеров. Требования безопасности». В стандарт вошли положения, разработанные в рамках настоящей диссертационной работы, сведения на основе аналитических данных и многолетнего практического опыта в сфере лазерной безопасности, впервые разработанные положения: категорирование ЛТО, классификация средств коллективной защиты (СКЗ) с учётом огораживаемых зон, требования безопасности для ручных лазерных систем и др.

Приведены результаты работ по разработке комбинированной сварочной маски, главная особенность которой – наличие светофильтра, ослабляющего как УФ- излучение, так и ЛИ на длине волны 1070 нм. В рамках сотрудничества с двумя зарубежными компаниями Optrel и Laser Pair проведены ис-

пытания светофильтра от ЛИ на устойчивость к ЛИ, составлено ТЗ и даны рекомендации по разработке защитной маски для операторов лазерного технологического оборудования.

На основании проведённых исследований даны уточнения о запрете использования в ЛТП определённого вида защитного экрана (СКЗ) из огнестойкой ПВХ-плёнки, которая неустойчива к ЛИ.

Приведены данные по апробации разработанной новой методики измерений облучённости от ЛИ и СИ при ЛТП, которая учитывает все особенности современного ЛТО и ЛТП.

Основные выводы и результаты работы

1. Установлено, что в силу особенностей взаимодействия ЛИ с материалами, помимо отражённого и рассеянного ЛИ, во время ЛТП возникает СИ, включающее спектры УФ-излучения, излучения видимого диапазона и ИК-излучения.

2. В зависимости от типа обрабатываемого материала (сталь, нержавеющая сталь, алюминиевый сплав, титановый сплав и др.), состав ТСОС имеет определённую комбинацию диапазонов длин волн.

3. Теоретически установлено и практически подтверждено, что при температурах плавления спектры эмиссии стали 09Г2С находятся во всех диапазонах УФ-излучения (УФ-А, УФ-В, УФ-С), для нержавеющей стали 12Х18Н10Т наиболее характерными являются линии УФ-А и фиолетового диапазона, алюминиевый сплав АМг6 имеет лишь одну широкую линию в фиолетовом диапазоне видимого излучения, а линии титанового сплава ВТ6 преобладают в УФ-А диапазоне длин волн, причём имеют наибольшую интенсивность и ширину в сравнении с остальными материалами.

4. Результаты расчётов и теоретические зависимости показывают, что наибольшие значения интенсивности ЛИ возможны лишь на расстоянии до 25 см от зоны обработки. По мере увеличения расстояния интенсивность рассеянного ЛИ уменьшается в 4 и более раз.

5. В рамках экспериментальной работы, с учётом возможностей монохроматора/спектрографа, установлено, что от общей интенсивности ТСОС УФ-излучение (300-380 нм) составляет $\approx 9\text{-}16\%$, излучение видимого спектра (380-740 нм) $\approx 47\text{-}54\%$ и ИК-излучение ближнего диапазона (740-900 нм) $\approx 31\text{-}41\%$ для всех рассмотренных в исследовании ЛТП.

6. Создан и апробирован в лабораторных исследованиях и в производственных условиях стенд для оперативной комплексной фиксации энергетических характеристик УФ-, видимого и ИК- излучений, составляющих ТСОС при различных лазерных процессах обработки металлов и сплавов.

7. Разработана и апробирована специализированная методика проведения измерений облучённости от диффузно-отражённого и рассеянного ЛИ и энергетических характеристик СИ (УФ-, видимого и ИК- излучения), возникающих во время ЛТП, которая позволяет учитывать специфические особенности ЛТП, включая их нестационарность и получить количественные значения интенсивности излучений определённых диапазонов спектра.

8. Доказано, что уровни облучённости отражённого ЛИ в ЛТП не имеют прямопропорциональную зависимость от выходной мощности ЛИ, но напрямую зависят от изменения плотности мощности ЛИ на поверхности материала.

9. Самый большой уровень облучённости от ЛИ зафиксирован при ручной сварке алюминиевого сплава типа АМг6, для стали 09Г2С наибольшая интенсивность определена при технологии гибридной лазерно-дуговой сварки, а для нержавеющей стали 12Х18Н10Т – для маркировки, что неочевидно, поскольку данная технология менее энергозатратная по сравнению с другими. Все полученные значения превышают ПДУ от 1,2 до 15,7 раз, в зависимости от процесса обработки.

10. В ЛТП обработки в состав ТСОС входит УФ-излучение, превышающее ПДИ от 1,2 до 4000 раз (в соответствии с СанПиН) при обработке алюминиевого сплава АМг6, титанового сплава ВТ6, нержавеющей стали

12Х18Н10Т и стали 09Г2С. Этот факт обуславливает необходимость применения средств защиты от УФ- излучения во всех исследуемых технологических процессах обработки металлических материалов.

11. На основе аналитической работы и многолетнего практического опыта в сфере лазерной безопасности впервые разработано категорирование ЛТО, классификация СКЗ с учётом огораживаемых зон, сформулированы требования безопасности для ручных лазерных систем. Эти положения и др. легли в основу разработанного национального стандарта ГОСТ Р 71028-2023 «Оптика и фотоника. Оборудование на базе волоконных лазеров. Требования лазерной безопасности».

12. Проведены работы по разработке комбинированной сварочной маски, обеспечивающей комплексную защиту от ЛИ и СИ, главная особенность которой – наличие светофильтра, ослабляющего ЛИ. Проведены испытания светофильтра, составлено ТЗ, даны рекомендации по разработке защитной маски более совершенной конструкции.

Публикации автора по теме диссертации

1. Крючина О.А., Садовников И.Э. Проблемы проведения измерений облучённости в процессе лазерной обработки металлов. // Фотоника. 2019. Т. 13, №3. С. 308-311 (0,46 п.л. / 0,34 п.л.)

2. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Совершенствование методики контроля отражённого и рассеянного излучения при лазерных технологических процессах // Технология машиностроения. 2021. №1. С. 63-67 (0,37 п.л. / 0,25 п.л.).

3. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Особенности энергетических характеристик световой технологической среды при лазерной и лазерно-дуговой обработке металлов волоконными лазерами // Технология машиностроения. 2023. №1. С. 21-28 (0,54 п.л. / 0,44 п.л.).