

Щеглов Павел Юрьевич

ПАРО-ПЛАЗМЕННЫЙ ФАКЕЛ В ПРОЦЕССАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА МЕТАЛЛЫ

01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

автор:



Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре лазерной физики «Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Петровский Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Малюта Дмитрий Дмитриевич
ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований,
г. Троицк Московской области;

доктор технических наук,
профессор Туричин Глеб Андреевич
Институт лазерных и сварочных технологий СПбГПУ,
г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: учреждение Российской академии наук
Институт проблем лазерных и
информационных технологий РАН,
г. Шатура Московской области.

Защита состоится «29» февраля 2012 г. в 12 час. 30 мин. на заседании
диссертационного совета в аудитории К-608 «Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409,
г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, тел. (495)324-87-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «27» января 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета

Ананьин О.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований. В последние 5-10 лет технология лазерной обработки металлов больших толщин получила широкий потенциал развития за счет разработки принципиально нового типа источников мощного лазерного излучения. Появился класс так называемых мощных твердотельных лазеров с высокой яркостью излучения, к которым на настоящий момент можно отнести волоконные лазеры на ионах иттербия и дисковые лазеры на кристаллах $YAG:Yb^{3+}$. Принципиально оба этих типа лазеров происходят от твердотельных лазеров с открытым оптическим резонатором, в котором в качестве активного элемента располагается кристаллический либо стеклянный стержень, легированный добавками редкоземельных элементов, оптически накачиваемый лампами-вспышками либо мощными диодами. Одной из главных проблем, ограничивающих выходную мощность излучения таких лазеров, является эффект термолинзы. Так как в этом случае относительно небольшой объем активной среды и ограниченные возможности теплоотвода принципиально не позволяют эффективно охлаждать рабочий элемент лазера, то существенное ухудшение качества излучения при увеличении мощности накачки становится неизбежным.

В случае волоконного лазера активный стержень «сужается» до размеров оптического волокна, которое за счет наличия нескольких оболочек с различными показателями преломления обеспечивает полное внутреннее отражение излучения на длинах волн генерации и накачки. При этом, так как излучение накачки поглощается в волокне на протяжении десятков метров, требования к охлаждению становятся минимальными, а качество излучения поддерживается на высоком уровне волноводными свойствами самого волокна.

В дисковом лазере происходит обратное – активный стержень «сжимается» до тонкого диска. При этом отвод тепла производится не с цилиндрической поверхности, а с плоской грани, что обеспечивает отсутствие перепадов

температуры в плоскости волнового фронта генерируемого излучения и уменьшает эффект терморелракции. Для увеличения эффективности генерации используется прием многократного прохождения излучения накачки через активную среду. При создании как дисковых, так и волоконных лазеров, активно применяется модульный принцип, когда излучение от нескольких независимых однотипных модулей собирается в одно волокно. Физическим ограничением мощности лазера в этом случае является предел оптической прочности выходного волокна и проявление нелинейно-оптических эффектов.

Помимо ряда экономических достоинств волоконных и дисковых лазеров, высокая яркость их излучения позволяет получать высокую плотность мощности одновременно с достаточно большой рэлеевской длиной пучка. Данное свойство является одним из главных преимуществ при использовании такого излучения в качестве источника энергии для сварки металлов больших толщин. Технология лазерной сварки металлов с глубоким проплавлением имеет большой потенциал использования в тяжелом машиностроении, прежде всего при производстве труб и прокладке трубопроводов высокого давления, сборке различных компонентов реакторов, а также в кораблестроении.

До появления первых волоконных лазеров высокой мощности лазерная сварка металлов больших толщин проводилась с использованием излучения газовых CO_2 -лазеров. К принципиальным физическим отличиям между волоконными и CO_2 -лазерами с точки зрения самого процесса сварки с глубоким проплавлением можно отнести более короткую длину волны излучения и отличие распределения плотности мощности по поперечному сечению лазерного пучка, которое для волоконного лазера имеет вид близкий к прямоугольному. Коэффициент поглощения коротковолнового излучения иттербиевого волоконного лазера (длина волны 1,07 мкм) для большинства сталей существенно выше, чем длинноволнового излучения CO_2 -лазера (длина волны 10,6 мкм). Оба указанных фактора являются неоспоримыми преимуществами в технологиях лазерной закалки, поверхностной обработки

или сварки тонких металлических пластин без образования парогазового канала (ПГК). Однако, в случае сварки металлов больших толщин они могут играть и негативную роль. Прямоугольное распределение интенсивности в лазерном пучке может приводить к более резким градиентам температуры в ванне расплава и на поверхности стенок парогазового канала, что служит дестабилизирующим фактором за счет повышенного влияния эффекта капиллярной термоконцентрационной неустойчивости. А высокий коэффициент поглощения излучения на поверхности металла может служить помехой для эффекта каналирования излучения при переотражении от стенок узкого парогазового канала.

Однако, наиболее существенные отличия возникают в процессах формирования и развития паро-плазменного сварочного факела, а также во влиянии этого факела на лазерное излучение. За долгий период исследования процесса сварки с глубоким проплавлением излучением газовых CO_2 -лазеров эффект образования сварочной плазмы был подробно изучен и описан. Согласно основной версии, при интенсивном испарении металла мощным лазерным излучением над поверхностью образуется облако металлического пара с небольшой концентрацией свободных электронов, которые за счет эффекта обратного тормозного поглощения получают некоторую долю энергии лазерного излучения и увеличивают свою кинетическую энергию. Когда кинетическая энергия электронов становится достаточно высокой для ионизации атомов железа, они начинают выбивать вторичные электроны из возбужденных атомов. Таким образом происходит лавинное увеличение числа свободных электронов и ионов, т.е. оптический пробой [1,2]. Так как в состоянии оптического пробоя почти вся энергия лазерного излучения поглощается плазмой, в технологии сварки мощными CO_2 -лазерами плотность мощности вкладываемой в металл энергии ограничена порогом оптического пробоя, хотя во многих случаях, путем использования защитных газов с высоким потенциалом ионизации, значение пороговой плотности мощности

может быть увеличено. Оптимальным режимом для сварки с глубоким проплавлением является т.н. предпороговое состояние, когда небольшая доля энергии лазерного излучения уже поглощается облаком свободных электронов, но их концентрация и энергия еще не достаточны для образования лавины. В этом режиме сварочная плазма оказывает некоторое стабилизирующее влияние на процесс.

Известно, что коэффициент обратного тормозного поглощения зависит от длины волны излучения λ , концентрации электронов n_e и температуры T следующим образом: $\alpha_{ib} \sim \lambda^2 n_e^2 T^{-3/2}$. Поэтому, в случае излучения волоконного лазера, длина волны которого на порядок меньше, чем у CO₂-лазера, коэффициент обратного тормозного поглощения свободными электронами в металлических парах оказывается на два порядка ниже. По этой причине даже при существенно более высоких плотностях мощности облако пара над поверхностью металла не разогревается и оптического пробоя не происходит. В то же время, как было показано при моделировании термодинамического состояния пара внутри и вне паро-газового канала [3], вследствие относительно низкой температуры над металлом, горячий металлический пар, вылетающий из парогазового канала, становится сильно пересыщенным, поэтому в этой области необходимо учитывать возможность его объемной конденсации и образования частиц конденсированной фазы. Согласно теоретическим оценкам [4-6], основывающимся на кинетическом описании роста кластера конденсата, частицы конденсированной фазы могут иметь размеры в диапазоне от 10 нм до 100 нм. В этом случае, при достаточно высокой концентрации частиц в сварочном факеле, может происходить поглощение или рассеяние значительной части мощности проходящего через него лазерного луча. Однако, в отличие от плазменного факела, который был подробно изучен в работах по исследованию процесса сварки излучением CO₂-лазера, как параметры мелких конденсированных частиц, так и их влияние на качество сварки остаются на

настоящий момент не до конца изученными. Исследователи не обращали должного внимания на данный эффект, так как в случае сварки металлов излучением CO₂-лазера, вследствие более высокой температуры плазмы, конденсация должна протекать менее интенсивно, и, кроме того, наличие некоторого количества мелких металлических кластеров субмикронных размеров влияет на длинноволновое излучение CO₂-лазера (область рассеяния Рэлея) намного меньше, чем на коротковолновое излучение твердотельных лазеров (область рассеяния Ми).

Косвенно наличие в сварочном факеле мелких поглощающих или рассеивающих объектов наблюдалось в нескольких работах, основанных на измерении пропускания пробного излучения, проходящего через факел параллельно поверхности металла. При этом регистрировалось некоторое ослабление пробного луча, однако оставался неясным вклад в данное ослабление различных возможных механизмов – терморелракции, поглощения в сварочной плазме, поглощения и рассеяния на мелких конденсированных частицах, а также влияния крупных капель жидкого металла, вылетающих из ванны расплава. Кроме того, вследствие низкого временного разрешения измерений, динамика ослабления описана не была, хотя очевидно, что для вопроса о влиянии эффекта ослабления на стабильность процесса сварки характер временных изменений величины ослабления играет очень важную роль. Помимо измерения ослабления пробного излучения также проводились исследования по регистрации рассеянного факелом излучения мощного твердотельного лазера. При этом был экспериментально показан факт наличия рассеяния, вероятно на мелких конденсированных частицах, однако количественного описания проведено не было. Сам по себе внешний вид сварочного факела также говорит о наличии в нем мелких частиц, так как форма светящейся области сильно отличается от плазменного факела, возникающего в случае сварки CO₂-лазером, и больше напоминает след луча, проходящего через запыленную среду.

В ряде работ были проведены эксперименты по прямому измерению размеров и химического состава частиц при их осаждении на холодную подложку, а также по использованию методов оптической диагностики, в частности многоволновой методики, для измерения среднего размера и концентрации частиц конденсата. Тем не менее, в такой постановке эксперименты не обеспечивали локальности измерений и не давали информации о временной динамике эффекта. Таким образом, полученные данные не дают подробного ответа на вопросы, как проходит процесс конденсации металлического пара в непосредственной близости от выхода из парогазового канала (ПГК), каковы параметры (прежде всего, размер и концентрация) облака конденсированных частиц над металлом и как это облако влияет на проходящее через него излучение мощного волоконного лазера в процессе сварки. Проведенные в данной работе исследования позволяют получить более систематическое представление обо всех упомянутых вопросах.

Цель работы. Целью настоящей работы является определение характеристик паро-плазменной среды сварочного факела, возникающего при воздействии мощного излучения волоконного лазера на металл, а также выявление физических эффектов, способных вызывать влияние факела на лазерное излучение.

Научная новизна и практическая значимость работы. Впервые проведен широкий комплекс исследований паро-плазменного факела, возникающего в процессе воздействия излучения мощного иттербиевого волоконного лазера на металлы:

- Впервые в одних и тех же условиях экспериментально определена степень влияния основных возможных механизмов взаимодействия мощного лазерного излучения со средой паро-плазменного факела

(таких как поглощение и рефракция в сварочной плазме и металлических парах, терморелракция на градиентах показателя преломления, влияние макроскопических брызг жидкого металла, вылетающих из ванны расплава, а также рассеяние и поглощение на мелких частицах конденсата);

- Определена структура среды паро-плазменного факела над ПГК, а также измерены характеристики лазерно-индуцированной плазмы в атмосфере воздуха и аргона;
- Методами оптической диагностики определены средние параметры облака конденсированных частиц (размер, концентрация);
- Впервые экспериментально показано наличие мелких частиц в пределах каустики пучка мощного волоконного лазера;
- Проведена оценка ослабления луча мощного волоконного лазера облаком мелких конденсированных частиц в процессе сварки.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

- В процессе сварки металлов мощными волоконными лазерами паро-плазменный факел разделяется на две различные части – сварочную плазму и облако конденсированных металлических частиц.
- Сварочная плазма находится в непосредственной близости от выхода паро-газового канала и, вследствие низкой электронной плотности и температуры, не оказывает влияния на проходящее через нее лазерное излучение и на процесс сварки в целом.
- Облако мелких металлических частиц располагается над сварочной плазмой и образуется при охлаждении и конденсации горячих паров металла, вылетающих из паро-газового канала.

- Частицы обладают субмикронными размерами (порядка 60-80 нм) и концентрацией порядка 10^{10} см^{-3} , и способны поглощать проходящее лазерное излучение.
- Под действием луча мощного волоконного лазера частицы конденсата разогреваются и образуют свечение верхней части сварочного факела, однако их полного испарения при этом не происходит.
- Ослабление излучения волоконного лазера происходит нерегулярно во времени и способно приводить к значительному ухудшению стабильности мощности излучения, достигающего поверхности металла, по сравнению с изначальной стабильностью выходной мощности лазера.
- Амплитуда колебаний величины полного поглощения луча мощного волоконного лазера, проходящего в процессе сварки через все облако конденсированных частиц, может быть около 10%, что может негативно влиять на качество сварных соединений металлов больших толщин.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- 18th International Laser Physics Workshop (LPHYS'09), Barcelona, Spain, 2009;
- Ежегодная конференция «Научная сессия МИФИ», Москва, Россия, 2009, 2010, 2011;
- Семинары Структурного подразделения 5.5 «Безопасность сварных конструкций» БАМ, Берлин, Германия, 2010, 2011;
- Семинар аспирантов Подразделения 5 «Материаловедение» БАМ Graduate Student Seminar (GSS), 2011;

- The 5th International Conference “Laser technologies in welding and materials processing”, Katsiveli, Ukraine, 2011;
- 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS’11), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2011;
- XXII Международная научно-техническая конференция «Лазеры в науке, технике, медицине», Геленджик, Россия, 2011;
- 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO-2011), Orlando, FL, USA, 2011.

Публикации по теме работы. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ в период с 2009 по 2012 год. Из них 4 статьи в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, а также 10 работ в тезисах и сборниках научных трудов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и изложена на 112 страницах машинописного текста, включая 44 рисунка, 3 таблицы и список литературы, содержащий 131 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, дан обзор работ в данной области исследований, сформулирована цель диссертации, отражена новизна и практическая значимость, приведены выносимые на защиту основные результаты работы, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы по теме взаимодействие лазерного излучения с веществом в процессе сварки металлов мощными

твердотельными лазерами с высокой яркостью излучения. Приведено краткое описание принципов работы мощных волоконных и дисковых лазеров, обуславливающих их преимущества перед традиционными твердотельными лазерами с ламповой или диодной накачкой. Дано объяснение термина «высокая яркость» через определения основных параметров гауссовского пучка, а также показаны преимущества лазеров с высокой яркостью излучения для лазерной технологии в целом и для сварки с глубоким проплавлением в частности. Проведено сравнение параметра качества излучения *BPP* для современных коммерческих мощных промышленных лазеров трех типов: газовый CO₂-лазер, лазер на тонких дисках и волоконный лазер (см. Табл. 1).

Кратко описаны проблемы, возникающие при сварке мощными волоконными лазерами металлов больших толщин, а также разобраны все возможные принципиальные отличия излучения волоконного лазера от излучения CO₂-лазера, способные приводить к данным проблемам.

Табл. 1. Характеристики качества пучка различных типов промышленных лазеров

Тип лазера	Модовый состав*	Мощность, кВт	Диаметр волокна, мкм	<i>BPP</i> , мм*мрад
CO ₂	ОМ	1,0	–	3,55
	МЛМ (1,2кВт)		–	5,64
Дисковый	МЛМ		50	2,0
Волоконный	ОМ		20	0,37
	ММ		100	4,0
CO ₂	ОМ		5,0	–
	МЛМ	–		6,14
Дисковый	МЛМ	100		4,0
	ММ (5,3кВт)	200		8,0
Волоконный	ОМ	20		0,37
	ММ	100		6,0
CO ₂	МЛМ	10,0	–	6,41
Дисковый	ММ		200/300	8,0/12,0
	Волоконный		ОМ	20
ММ			200	8,0
CO ₂	ММ	20,0	–	15,19
Дисковый	ММ	16,0	200/300	8/12
Волоконный	ММ	50,0	100	4,5

*ОМ – одномодовый; МЛМ – маломодовый; ММ – многомодовый

Приведено общепринятое объяснение механизма формирования паро-плазменного факела под действием лазерного излучения, дано определение оптического пробоя и сформулированы критерии его возникновения.

Из теоретических предпосылок и обзора проведенных исследований показано, что в то время, как в случае сварки излучением CO₂-лазера, плотность мощности лазерного излучения приходится как правило уменьшать, для того чтобы не допустить развития оптического пробоя и поглощения в нем большей части лазерного излучения, при сварке излучением мощного волоконного лазера, вследствие более низкого коэффициента обратного тормозного поглощения, сварочная плазма должна оставаться достаточно холодной и не оказывать влияния на лазерное излучение даже при плотностях мощности порядка 10^7 Вт/см².

Во второй главе представлены результаты экспериментов по спектроскопии сварочной плазмы, а также данные высокоскоростного видеонаблюдения сварочного факела в атмосфере воздуха и аргона. Показано, что весь сварочный факел состоит из двух частей, различных по динамике, геометрической форме и другим параметрам (см. Рис. 1а).

Нижняя часть (см. Рис. 1б-с) представляет собой сварочную плазму, температура которой, как и предполагалось из теоретических оценок, остается небольшой вплоть до мощности лазерного излучения 20 кВт. Верхняя часть соответствует по форме каустике пучка волоконного лазера и образуется предположительно за счет свечения мелких частиц конденсата, разогреваемых лазерным лучом.

При помощи спектрометра были измерены спектры эмиссии сварочной плазмы в нижней части факела для случаев сварки в среде воздуха, аргона и гелия. На фоне непрерывного излучения в спектрах видны линии, соответствующие в основном переходам электронов в нейтральном атоме железа и некоторых легирующих элементов, однако ни линий ионов железа, ни

линий атомов защитных газов обнаружено не было, что свидетельствует о низкой температуре плазмы, не достаточной для ионизации и возбуждения высоколежащих уровней. Также было отмечено резкое уменьшение интенсивности эмиссии и количества наблюдаемых спектральных линий при подаче в область сварки защитных газов.

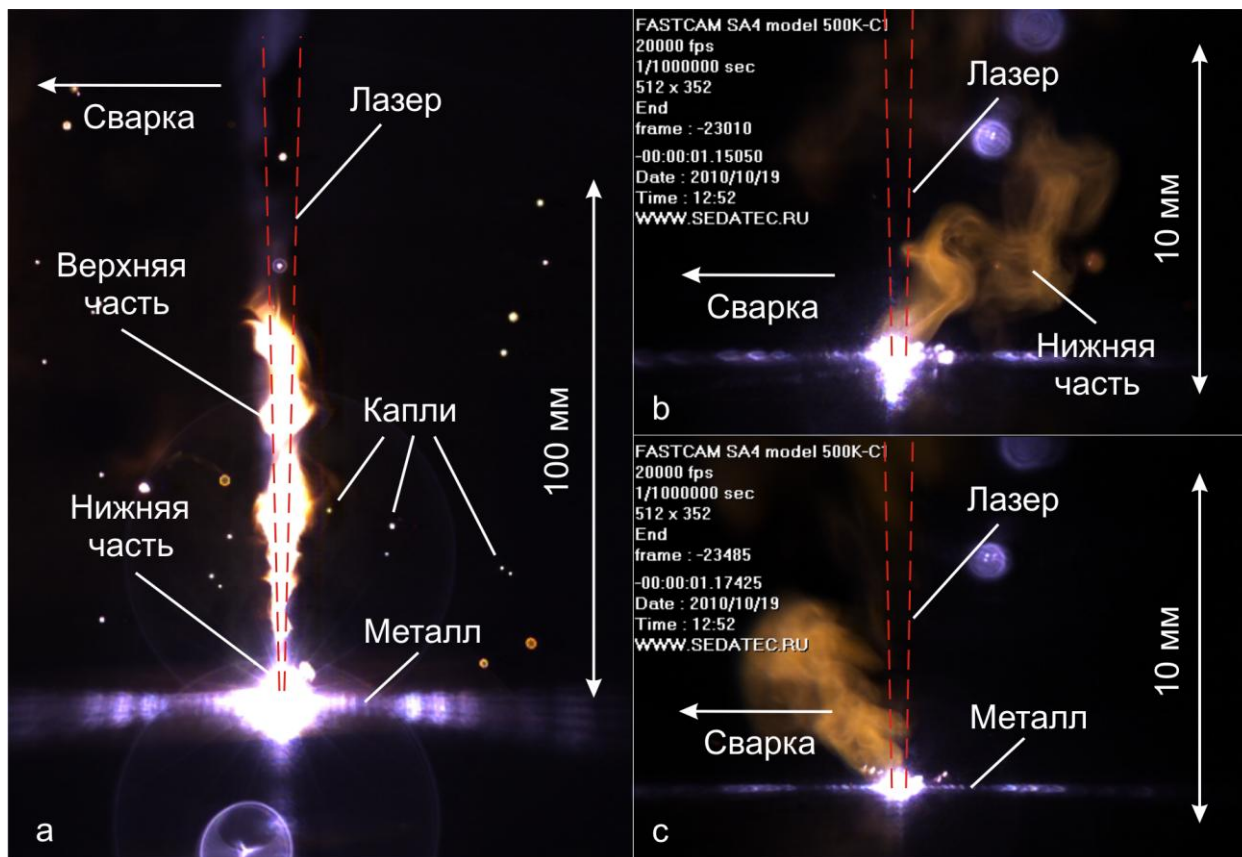


Рис. 1. Результаты скоростного видеонаблюдения различных областей сварочного факела.

По измеренным спектрам были построены больцмановские диаграммы и определены температура и концентрация электронов в сварочной плазме (см. Рис. 2). При максимальной мощности лазерного излучения степень ионизации и электронная плотность имеют, соответственно, значения $\sim 10^{-3}$ и $6,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Рассчитанный для данных значений коэффициент обратного тормозного поглощения для излучения с длиной волны 1,07 мкм составляет:

$$\alpha_{ib} \approx 3,3 \cdot 10^{-41} n_e^2 T^{-3/2} \approx 0,6 \text{ м}^{-1}$$

При этом относительное ослабление луча волоконного лазера при прохождении характерной длины плазменного факела $L = 1$ см составляет:

$$E = \frac{I_0 - I_t}{I_0} = 1 - e^{-\alpha_{\text{об}} L} \approx 6 \cdot 10^{-3}$$

где I_0 , I_t , – интенсивность начального и прошедшего излучения, соответственно.

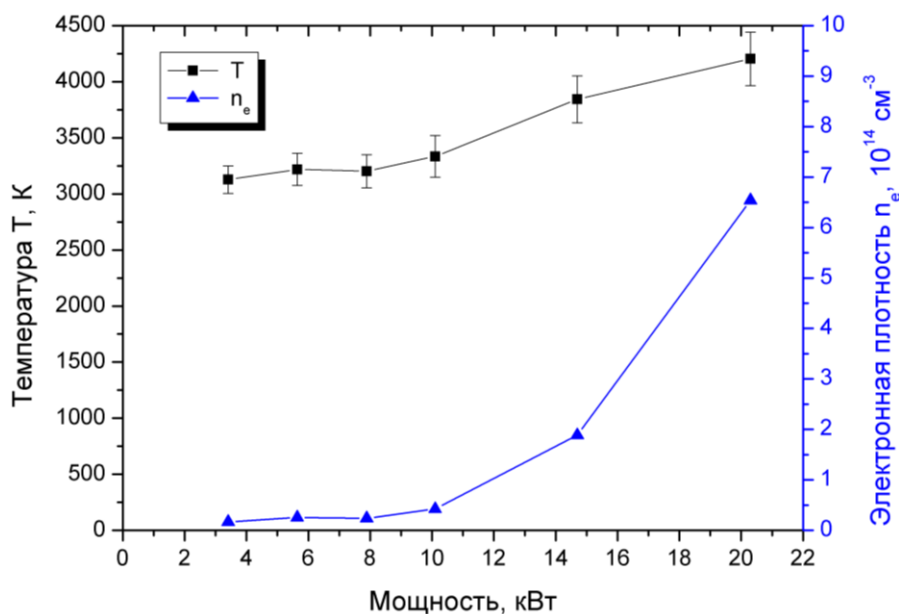


Рис. 2. Зависимость температуры и электронной плотности сварочной плазмы от мощности лазерного излучения, высота над поверхностью металла 2 мм.

Столь малое значение ослабления доказывает предположение о том, что при сварке металлов мощными твердотельными лазерами с длиной волны излучения 1,07 мкм влиянием непосредственно самой сварочной плазмы на процесс сварки можно полностью пренебрегать.

При сопоставлении зависимостей температуры сварочной плазмы от высоты для случаев сварки на воздухе и в аргоне было показано, что подача аргона приводит к охлаждению только нижней части сварочного факела, в то время, как температура верхней части остается неизменной. На результатах видеонаблюдения при этом также заметно исчезновение свечения сварочной плазмы около поверхности металла, однако свечение верхней части может становиться еще ярче.

Кроме того, при подсветке области взаимодействия мощным источником белого света было обнаружено поглощение излучения подсветки в верхней части факела, вызванное облаком мелких конденсированных частиц. Данные результаты наглядно подтвердили предположение о том, что свечение верхней части сварочного факела возникает только в те моменты, когда облако частиц попадает под каустику луча мощного волоконного лазера. Причиной свечения частиц является, по-видимому, их разогрев при поглощении лазерного излучения. Это предположение подтверждается тем, что спектр эмиссии верхней части имеет не линейчатый, как в случае сварочной плазмы, а непрерывный тепловой характер.

В третьей главе проведено измерение пробного излучения в верхней части сварочного факела. Для этого использовался диодный лазер с длиной волны 1,3 мкм и мощностью 1 мВт, луч которого пропусклся через факел в поперечном направлении параллельно поверхности металла. На основании серии измерений были построены пространственные распределения величины относительного ослабления $E = (I_0 - I_t) / I_0$ в направлении сварки и в поперечном направлении на различных высотах факела h .

Так как данные распределения могли быть с достаточно хорошей точностью аппроксимированы гауссовскими функциями, то, предполагая осевую симметрию, с помощью обратного преобразования Абеля [7] было восстановлено пространственное распределение коэффициента поглощения во всем объеме верхней части сварочного факела (см. Рис. 3).

Как видно из рисунка, значение коэффициента ослабления может составлять величину порядка нескольких единиц на метр, что намного выше коэффициента обратного тормозного поглощения излучения с данной длиной волны в сварочной плазме с параметрами, определенными ранее. Это значит, что наблюдаемое ослабление имеет другую природу.

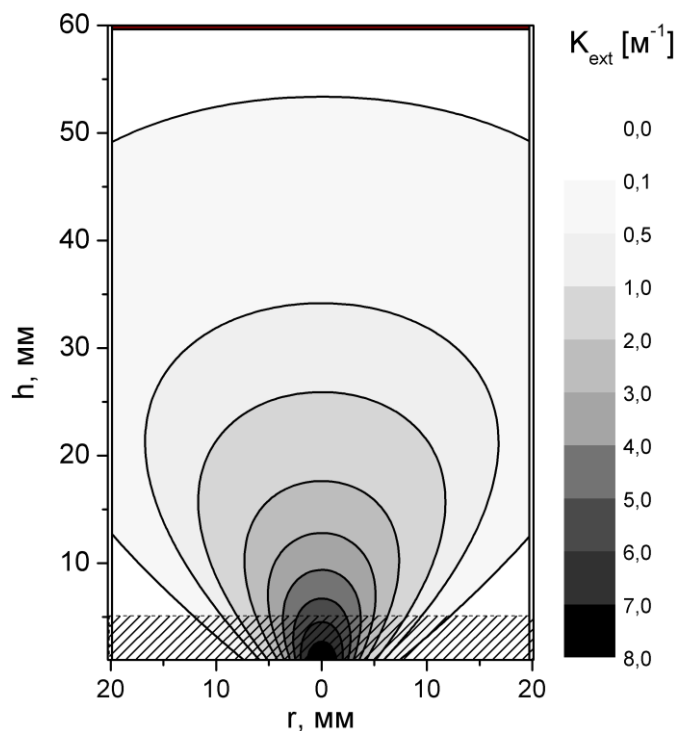


Рис. 3. Пространственное распределение коэффициента ослабления пробного излучения над ПГК; заштрихованная область – нижняя часть факела (сварочная плазма).

Для того, чтобы понять, насколько большой вклад в регистрируемое ослабление мог вносить эффект терморелракции пробного излучения на градиенте показателя преломления в сварочном факеле был проведен эксперимент по измерению максимального угла отклонения луча He-Ne лазера. При этом конфигурация прохождения пробного луча через среду факела была аналогична той, что использовалась в эксперименте по измерению ослабления лазерного излучения. В результате, значение максимального углового отклонения составило не более 0,5 мрад, что обеспечивает независимость измеряемых ослаблений от данного эффекта. На основании анализа поведения детектируемых сигналов также была исключена возможность влияния макроскопических капель жидкого металла, вылетающих из ванны расплава.

Также отмечено, что сигнал ослабления не сохраняется постоянным в течение процесса сварки, а постоянно изменяется с характерными временами порядка миллисекунд.

В четвертой главе проведено исследование процесса конденсации металлического пара в среде сварочного факела. Описаны теоретические предпосылки процесса конденсации, а также дан краткий обзор работ по изучению свойств конденсированных частиц и их влияния на качество сварки. После этого приведены результаты эксперимента по измерению среднего размера и концентрации конденсированных частиц. Для этого регистрировались спектры пропускания среды сварочного факела для пробного излучения в спектральных диапазонах 198÷432 нм и 381÷588 нм. Обнаружено, что помимо наличия линейчатого спектра поглощения, соответствующего атомарным переходам в парах железа, основная доля энергии пробного излучения поглощается в непрерывном спектре, соответствующем спектру поглощения мелкими частицами. Для определения среднего размера и концентрации частиц использовалась многоволновая методика [8]. В предположении, что все частицы в факеле состоят из чистого железа и имеют некоторый средний размер a_0 , по измеренным спектрам определены отношения логарифмических функций ослабления $\ln[1 - E(\lambda)]$ для различных пар длин волн λ_1, λ_2 . Значения a_0 находились из численного решения уравнения:

$$\frac{Q_{ext}(a_0, \lambda_1)}{Q_{ext}(a_0, \lambda_2)} = \frac{\ln[1 - E(\lambda_1)]}{\ln[1 - E(\lambda_2)]}$$

где $Q_{ext}(a_0, \lambda)$ – коэффициент экстинкции, однозначно вычисляемый для выбранных значений a_0 и λ из уравнений теории рассеяния Ми.

Результаты расчетов среднего диаметра частиц на различных высотах сварочного факела приведены на Рис. 4 (слева). Несмотря на большие изменения абсолютного пропускания в течение процесса сварки, размер частиц при этом оказывался практически постоянным, что говорит о том, что изменение пропускания связано в большей степени с изменениями концентрации конденсированных частиц в факеле. Поэтому, применяя

формулы теории рассеяния Ми при полученных размерах частиц для пространственных распределений ослабления, измеренных в Главе 3, была построена функция распределения концентрации частиц конденсата в сварочном факеле (см. Рис. 4, справа).

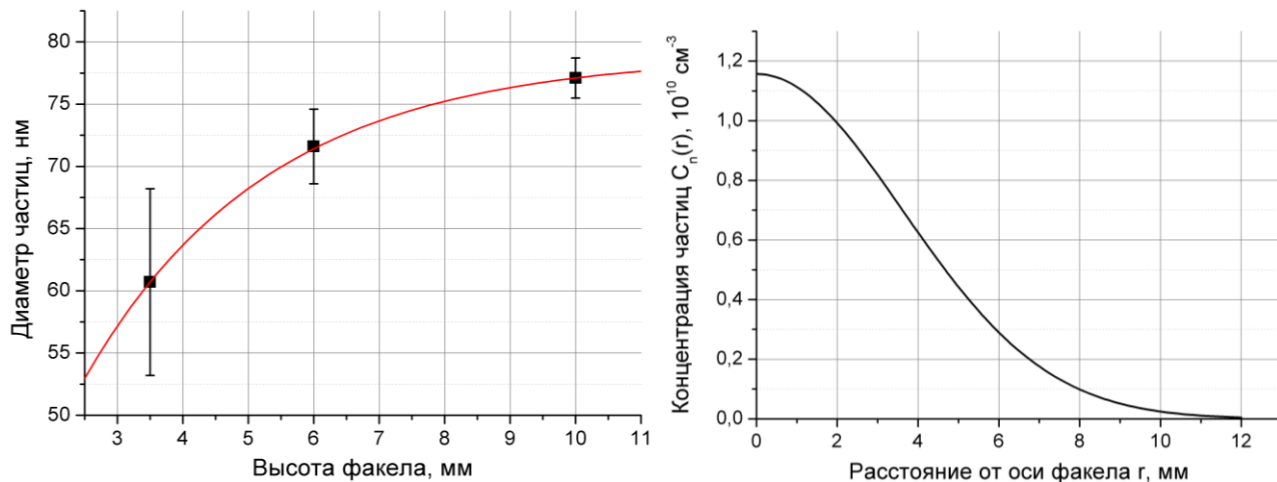


Рис. 4. Средний диаметр частиц a_0 на различных высотах (слева) и пространственное распределение концентрации частиц конденсата на высоте 10 мм (справа).

Используя полученные параметры частиц был проведен расчет коэффициента ослабления для длины волны излучения 1,3 мкм, который бы имела среда, состоящая из данных частиц. Результат оказался сопоставим со значением измеренного напрямую коэффициента ослабления лазерного излучения с длиной волны 1,3 мкм, приведенным на Рис. 3. Данный факт говорит о том, что описанное в Главе 3 ослабление вызвано главным образом мелкими конденсированными частицами.

Для ответа на вопрос, происходит ли испарение частиц конденсата под действием лазерного излучения, было проведено детектирование рассеянного пробного излучения на длине волны 0,53 мкм, которое вводилось в оптический тракт волоконного лазера и таким образом давало информацию о частицах, находящихся непосредственно в области каустики мощного лазерного пучка. Так как сигнал рассеяния наблюдался по всей высоте факела и качественно соответствовал сигналам ослабления, описанным в Главе 3, то был сделан вывод, что частицы только разогреваются и, возможно, незначительно

уменьшаются в размерах (Об этом же говорят и результаты некоторых теоретических расчетов). Поэтому, воспользовавшись измеренными параметрами частиц, было пересчитано распределение коэффициента ослабления (Рис. 3) для длины волны иттербиевого волоконного лазера 1,07 мкм и проведена оценка интегрального ослабления луча мощного волоконного лазера, распространяющегося через весь факел от сварочной головы к поверхности металла. Полученное значение составило около 12%.

С учетом временной динамики ослабления, описанной в Главе 3, можно сделать вывод о том, что сварочный факел способен вызывать модуляцию мощности лазерного излучения, доходящего до поверхности металла. За счет поглощения мелкими конденсированными частицами, изначально высокая временная стабильность мощности излучения волоконного лазера может быть значительно ухудшена. Известно, что низкая временная стабильность мощности излучения в процессе лазерной сварки может приводить к разбрызгиванию расплава и ухудшению качества процесса [9], поэтому описанный эффект следует принимать во внимание при разработке определенных видов технологий лазерной сварки с глубоким проплавлением.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Проведены экспериментальные исследования паро-плазменного факела, возникающего в процессе сварки низколегированных сталей больших толщин излучением мощного (10÷20 кВт) иттербиевого волоконного лазера.

2. Экспериментально определено, что температура и концентрация электронов в индуцируемой лазерным излучением сварочной плазме малы ($T < 4500$ К, $n_e < 10^{15}$ см⁻³). На основании этих данных можно утверждать, что поглощение и рефракция излучения плазмой в данном процессе не способны влиять на качество сварочного процесса.

3. Показано, что паро-плазменный факел, помимо сварочной плазмы, возникающей в относительно небольшой (5-10 мм) области около поверхности

металла, имеет протяженную (до 60-70 мм) верхнюю часть, которая состоит из облака мелких конденсированных частиц и способна поглощать лазерное излучение.

4. Экспериментально измеренный средний размер конденсированных металлических частиц в сварочном факеле, в зависимости от высоты факела и параметров сварочного процесса, составляет от 80 нм до 110 нм, а их концентрация на оси факела порядка 10^{10} см⁻³.

5. Ослабление пробного излучения в верхней части сварочного факела вызвано в подавляющей степени поглощением конденсированными металлическими частицами. Экспериментально измеренный коэффициент ослабления для длины волны излучения 1,3 мкм составляет величину порядка нескольких обратных метров, что гораздо больше коэффициента обратного тормозного поглощения в сварочной плазме.

6. Использование защитного газа (Ar, He) в области сварки приводит к эффективному охлаждению сварочной плазмы в нижней части факела вплоть до полного подавления, однако при этом влияние верхней части, вследствие более интенсивного процесса конденсации над ПГК, может становиться сильнее.

7. Интегральное ослабление пучка волоконного лазера, распространяющегося к поверхности металла через всю высоту сварочного факела, может составлять примерно 10%. С учетом временной динамики, данный эффект способен приводить к серьезному ухудшению стабильности мощности лазерного излучения, достигающего входа в ПГК.

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе в 4 статьях в реферируемых журналах:

1. П.Ю. Щеглов, М. Ретмайер, А. Гуменюк. Исследование влияния пылевой плазмы над каналом глубокого проплавления на излучение иттербиевого волоконного лазера // В кн. «Сборник научных трудов» конференции «Научная сессия МИФИ-2010». 2010. Том 2. С. 194.
2. V.N. Petrovskiy, N.M. Prokopova, P.Yu. Shcheglov, A.P. Streltsov, Yu.A. Vdovin, and V.M. Yermachenko. Detection of radiation of powerful fiber

lasers reflected back from metals in course of laser processing // Laser Physics Letters Vol. 7, No. 5, 2010, pp. 396-401.

3. В.Н. Петровский, С.А. Успенский, П.Ю. Щеглов. Исследование влияния защитных газов на паро-плазменный факел при сварке мощным волоконным лазером // В кн. «Сборник научных трудов» конференции «Научная сессия МИФИ-2011». 2011. Том 2. С. 87.
4. П.Ю. Щеглов, С.А. Успенский, В.Н. Петровский, А.В. Гуменюк, М. Ретмайер. Исследование паро-плазменного факела при сваке мощным волоконным лазером // В кн. «Сборник научных трудов» конференции «Научная сессия МИФИ-2011». 2011. Том 2. С. 90.
5. П.Ю. Щеглов, С.А. Успенский, В.Н. Петровский, А.В. Гуменюк, М. Ретмайер. Ослабление лазерного излучения в плазменном факеле при сварке мощным волоконным лазером // В кн. «Сборник научных трудов» конференции «Научная сессия МИФИ-2011». 2011. Том 2. С. 91.
6. P.Yu. Shcheglov, S.A. Uspenskiy, A.V. Gumenyuk, V.N. Petrovskiy, M. Rethmeier, and V.M. Yermachenko. Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding // Laser Physics Letters Vol. 8, No. 6, pp. 475-480.
7. В.Н. Петровский, С.А. Успенский, П.Ю. Щеглов, А.В. Гуменюк, М. Ретмайер. Исследование паро-плазменного сварочного факела при сварке мощным иттербиевым волоконным лазером // Ядерная физика и инжиниринг, Т. 2, № 2, 2011, с. 159-165.
8. П.Ю. Щеглов, А.В. Гуменюк, М. Ретмайер, С.А. Успенский, В.Н. Петровский. Исследование сварочного факела при сварке мощными волоконными лазерами // Proceedings of 5th International Conference „Laser Technologies in Welding and Materials Processing“, May 24-27, Katsiveli, Ukraine, 2010.
9. P.Yu. Shcheglov, A.V. Gumenyuk, M. Rethmeier, S.A. Uspenskiy, V.N. Petrovskiy, V.M. Yermachenko. Influence of the Welding Plume on Laser

- Radiation during High Power Fiber Laser Welding // Book of Abstracts “20th International Laser Physics Workshop (LPHYS’11), July 11-15, 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Paper 08.05.04.
10. P.Yu. Shcheglov, S.A. Uspenskiy, V.M. Yermachenko, A.P. Kuznetsov V.N. Petrovskiy, A.P. Streltsov. Line and Continuum Emission Spectroscopy of the High Power Ytterbium Fiber Laser Welding Plume under Ar and He Shielding Atmosphere // Book of Abstracts “20th International Laser Physics Workshop (LPHYS’11), July 11-15, 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Paper 08.P.01.
 11. P.Yu Shcheglov, S.A. Uspenskiy, Peculiarities of vapor-plasma plume during the high power fiber laser metal welding // В кн. «Сборник научных трудов» XXII международной научно-технической конференции «Лазеры в науке, технике, медицине», 20-23 сентября 2011 г., г. Геленджик, Россия.
 12. A.V. Gumenyuk, V.N. Petrovskiy, M. Rethmeier, P.Yu. Shcheglov, Condensed metal particles influence during the high power fiber laser welding // В кн. «Сборник научных трудов» XXII международной научно-технической конференции «Лазеры в науке, технике, медицине», 20-23 сентября 2011 г., г. Геленджик, Россия.
 13. P. Shcheglov, A. Gumenyuk, I. Gornushkin, M. Rethmeier. Experimental Investigation of the Laser-Plume Interaction during High Power Fiber Laser Welding // Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO-2011), 23-27 October, Orlando, FL, USA, Paper 1606.
 14. P.Yu. Shcheglov, A.V. Gumenyuk, I.B. Gornushkin, M. Rethmeier and V.N. Petrovskiy. Vapor-plasma plume investigation during high power fiber laser welding // Laser Physics Vol.22, No.7, 2012.

Список цитируемой литературы.

- [1] Ю.П. Райзер, Лазерная искра и распространение разрядов, М.: Наука, 1974.
- [2] А.Н. Грезев, Плазмообразование при лазерной сварке с глубоким проплавлением, Современные лазерно-информационные и лазерные технологии, Сборник трудов ИПЛИТ РАН под ред. В.Я. Панченко, В.С. Голубева, 2004, 228-235.
- [3] І.В. Кривцун, Звіт по проекту № Ф28.7/028 «Моделювання процесів тепло- і масообміну в ванні розплаву, парогазовому каналі та плазмовому факелі при лазерному зварюванні з глибоким проплавленням», ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАНУ, 2009.
- [4] I.V. Krivtsun, S.B. Sukhorukov, V.N. Sidoretz, O.B. Kovalev, Modelling of the processes of evaporation of metal and gas dynamics of metal vapour inside a keyhole in laser welding, Paton Welding Journal 10, 16-21, 2008.
- [5] С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко, Действие излучения большой мощности на металлы, Изд. «Наука», М.:1970.
- [6] Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, Кинетика формирования нанокластеров конденсированной фазы в плазменном факеле при гибридном лазерно-дуговом воздействии на металлические материалы, Proceedings of the IV International Conference Beam Technologies and Laser Application, Saint-Petersburg, Russia, 2009.
- [7] S.L. Ma, H.M. Gao, G.J. Zhang, and L. Wu, Appl. Spectrosc. 62, p. 701, 2008.
- [8] R. Dittmann, H.J. Feld, W. Samenfink, S. Wittig, Multiple Wavelength Extinction Technique for Particle Characterisation in Dense Particle Clouds, Part. Part. Syst. Charact. 11 (1994) 379-384.
- [9] T. Klein, M. Vicanek and G. Simon, Forced oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding, J. Phys. D, 29(1996), 322-332.