

На правах рукописи

Дубров Александр Владимирович

**ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА
МЕТАЛЛА В ТЕХНОЛОГИИ РЕЗКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СО₂-ЛАЗЕРА**

Специальность: 05.27.03 – «Квантовая электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Шатура – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук.

Научный руководитель:	Панченко Владислав Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
Официальные оппоненты:	Аракелян Сергей Мартирович, доктор физико-математических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, заведующий кафедрой физики и прикладной математики Кудряшов Сергей Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Защита состоится 19 ноября 2015 года в 11:30 на заседании диссертационного совета Д 002.126.01 на базе Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук, по адресу: 140700, Шатура, ул. Святоозерская, 1, Круглый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук www.laser.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н., с.н.с.

Дубров В.Д.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Лазерные термические технологии (резка, сварка, наплавка и др.) к настоящему времени широко распространены в таких отраслях промышленности, как машино- и приборостроение, при производстве автомобилей, судов, самолетов и т.д. Наиболее практически освоенной областью лазерной обработки металлов является технология лазерной резки (ЛР) излучением CO_2 - и твердотельных лазеров с использованием вспомогательного (режущего) газа для выноса расплава. Однако существует разрыв между практическим применением лазеров и пониманием физических процессов, сопровождающих воздействие лазерного излучения на материал. Несмотря на множество проведенных исследований, к настоящему времени отсутствует общепризнанная модель, описывающая динамику расплава, образование шероховатости боковой кромки и грата на нижней поверхности разрезаемого образца.

В литературе рассматривается ряд возможных механизмов, приводящих к образованию неустойчивостей течения расплава во время ЛР и определяющих сложный характер его движения [1]. Для установления механизмов, оказывающих преимущественное влияние на динамику расплава, и их корректного аналитического описания требуется сопоставление теоретических результатов с экспериментальными данными.

Диагностика течения расплава в процессе ЛР осложнена рядом факторов. Исследуемые процессы протекают в пространственной области шириной в несколько сотен микрон, находящейся в толще непрозрачного (в оптическом диапазоне) образца. Высокая температура, нестационарность процессов и перемещение исследуемой области в пространстве затрудняют прямое наблюдение и диагностику. В литературе описаны модельные эксперименты, условия которых в той или иной степени отличаются от реального технологического процесса, что неизбежно ограничивает применимость полученных результатов. В этой связи важным направлением дальнейшего развития лазерных термических технологий следует считать разработку методов и средств изучения динамики расплава в процессе ЛР без внесения изменений в схему и параметры технологического процесса [2].

Получение информации о динамике расплава при ЛР позволит продвинуться в понимании процессов, происходящих на фронте воздействия лазерного излучения на материал, и поможет разработать эффективные системы контроля процесса ЛР. Применение таких систем с обратной связью даст возможность повысить качество и надежность выполнения операций, что важно для увеличения автономности лазерных технологических комплексов, например, при использовании в безлюдных производствах.

Данная информация будет полезной и при анализе возможности влияния протекающих в зоне взаимодействия процессов на стабильность генерации самих источников излучения.

Таким образом, исследования динамики расплава в процессе ЛР, а также разработка методов проведения таких исследований, являются актуальными проблемами и важны для дальнейшего развития лазерных технологий.

Целью работы является разработка и применение методов исследования динамики расплава в реальном процессе лазерной резки металла, направленные на получение новой информации о происходящих физических процессах и усовершенствование технологии и оборудования.

Задачи исследования

1. Разработка методов получения информации о динамике расплава на фронте воздействия излучения на материал в условиях реального технологического процесса лазерной резки металла.
2. Создание диагностического оборудования, позволяющего осуществлять регистрацию пространственно-временной динамики расплава при ЛР, и проведение с его помощью экспериментальных исследований.
3. Разработка методики обработки и анализа экспериментальных данных о флуктуации теплового излучения расплава для получения информации о форме и динамике его поверхности с использованием корреляционных, спектральных и статистических методов.
4. Сопоставление полученных экспериментальных данных с существующими моделями образования неоднородностей рельефа поверхности потока жидкости.

Научная новизна

1. Предложена и реализована оригинальная методика оптической диагностики течения расплава металла в процессе ЛР, основанная на использовании многоканальной пирометрической регистрации теплового излучения одновременно из нескольких областей фронта реза, а также корреляционных, спектральных и статистических методов обработки данных. С помощью этой методики установлены зависимости скорости поверхности расплава и длины волны возбуждающихся гидродинамических волн от параметров процесса резки низкоуглеродистой стали СО₂-лазером.
2. Экспериментально обнаружено, что в зависимости от параметров процесса ЛР могут существовать квазистационарные режимы течения расплава, при которых происходит периодическая смена двух или более устойчивых значений скорости перемещения его поверхности. Показано, что с ростом скорости резки происходит увеличение количества устойчивых значений скорости поверхности и диапазона их изменения.
3. Проведен теоретический анализ возможности развития неустойчивости с образованием волн на поверхности расплава в условиях ЛР в рамках гидродинамической модели движения жидкой пленки, увлекаемой турбулентным потоком газа, с учетом вариации градиента давления и касательного напряжения вдоль волнистой поверхности. Показано, что различия полученных экспериментальных и расчетных результатов можно объяснить резонансом мод с усилением длинноволновой моды.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные методики многоканальной регистрации осцилляций теплового излучения с фронта реза и последующей обработки полученных данных, основанные на определении скорости случайных температурных неоднородностей, позволяют измерять скорость поверхности расплава в процессе ЛР металлов.
2. В зависимости от параметров процесса ЛР могут существовать квазистационарные режимы течения расплава, при которых происходит периодическая смена нескольких устойчивых значений скорости перемещения его поверхности.

3. В процессе газолазерной резки стали на поверхности потока расплава возбуждаются гидродинамические волны миллиметрового диапазона, длина волны которых слабо зависит от скорости резки и давления вспомогательного газа.
4. При учете механизма резонансного усиления длинноволновой моды в гидродинамической модели течения жидкой пленки, увлекаемой турбулентным потоком газа, с использованием вариации касательного и нормального напряжений вдоль волнистой поверхности, расчетные и экспериментальные значения длины волны удовлетворительно согласуются. При использовании давления вспомогательного газа до 0.25 МПа и высоких (для фиксированной толщины металла) скоростей резки расчетные и экспериментальные значения совпадают.

Практическая значимость.

Разработанные методики диагностики процесса ЛР на основе многоканальной пирометрической регистрации теплового излучения одновременно из нескольких областей фронта реза совместно с методами обработки экспериментальных данных позволяют определять важные характеристики течения расплава, такие как скорость потока и параметры гидродинамических волн на его поверхности. Данные методы могут применяться при разработке программной и аппаратной частей приборов и средств контроля качества выполнения технологических операций, проводимых с использованием устройств квантовой электроники.

Апробация работы

Основные результаты работы и отдельные её части докладывались и обсуждались на научных семинарах ИПЛИТ РАН под руководством академика В.Я. Панченко, а также на российских и международных конференциях: ALT'2014 (Кассис, Франция), ILLA'2014 (Шатура), ALT'2013 (Будва, Черногория), CAOL'2013 (Судак, Украина), Оптика лазеров (Санкт-Петербург, 2012), Photonics Europe 2012 (Брюссель, Бельгия), ALT'12 (Тун, Швейцария), Laser & Fiber-Optical Networks Modeling LFNМ*2011, (Харьков, Украина), ICONO/LAT-2010 (Казань), CAOL'2010 (Севастополь, Украина), ALT'10 (Egmond aan Zee, Нидерланды), IX и X Межвузовских научных школах молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике,

электронике, экологии и медицине” (Москва, 2008 и 2009).

Достоверность полученных результатов определяется использованием известного корреляционного метода, сравнением экспериментальных данных с результатами исследований других авторов, воспроизводимостью результатов в многократных экспериментах, при варьировании параметров эксперимента в широком диапазоне значений, использованием единой методики при проведении исследований, удовлетворительным соответствием экспериментальных данных с результатами расчетов.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 101 наименования и одного приложения. Материал работы изложен на 125 страницах, содержит 28 рисунков и одну таблицу.

Личный вклад автора

В диссертации изложены результаты исследований, выполненных автором лично. Обсуждения на всех этапах работы: при постановке задач исследований, их реализации, интерпретации полученных результатов осуществлялись совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность исследований, изложены цели, задачи и научная новизна работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, определена структура диссертации.

В **главе 1** представлен обзор научной литературы по теме диссертационной работы. Изложены актуальные аспекты ЛР с использованием вспомогательного газа. Особое внимание уделено особенностям поглощения лазерного излучения металлом и процессам удаления расплава, с учетом воздействия струи газа. Рассмотрены способы диагностики процессов, происходящих при воздействии

лазерного излучения на металл. Проведен анализ подходов к проведению мониторинга ЛР в режиме реального времени.

В главе 2 анализируется возможность использования теплового излучения из зоны воздействия лазерного излучения на металл для диагностики динамики расплава во время ЛР. Описывается схема проведения эксперимента и разработанная экспериментальная установка. Приводятся полученные временные зависимости яркостной температуры в четырёх областях фронта реза, оценивается характер температурных колебаний, и анализируются механизмы их возникновения.

Рассмотрим основные причины возникновения переменного температурного поля на фронте реза. Во время ЛР наклон и профиль фронта зависят, в том числе, от скорости резки, толщины разрезаемого материала, давления газа и применяемой длины волны излучения. На поверхности расплава всегда присутствуют горбы и впадины, вызванные теми или иными причинами [1]. Это расширяет диапазон локальных углов падения лазерного излучения. Поскольку для металлов характерна сильная зависимость коэффициента поглощения от угла падения, распределение поглощенной энергии лазерного излучения на фронте реза оказывается промодулировано наклоном локальной площадки. Коэффициент поглощения в различных областях фронта может отличаться в несколько раз, приводя к неоднородному нагреву [3]. Также, при крупных возмущениях рельефа, возможно образование под ними областей тени, в которых поглощается лишь рассеянное излучение.

Металлы проявляют быструю реакцию роста температуры на поглощенную энергию излучения. В результате локальное изменение температуры соответствует динамике возмущений рельефа поверхности. Последние перемещаются относительно объёма расплава, изменяя условия локального поглощения, и вызывают соответствующее перемещение температурных неоднородностей. Нелинейная зависимость коэффициента поглощения от наклона локальной площадки не позволяет восстановить по температурному сигналу точный профиль рельефа поверхности. При этом частотные характеристики поля температуры и поверхностных возмущений согласуются.

Если возмущение рельефа, в некоторой области которого происходит повышенное поглощение излучения и нагрев, обладает ненулевой скоростью

относительно поверхности расплава, то за таким возмущением будет формироваться температурный «шлейф», состоящий из приповерхностного объема расплава, нагретого ранее. Сложная структура рельефа и одновременное развитие множества подобных эффектов неизбежно приведут к тому, что однородность температуры в «шлейфе» будет нарушена. Источником случайных температурных неоднородностей также является самая верхняя область фронта, где происходит периодическое изменение формы поверхности, влияющее на поглощение излучения и температуру поступающего вниз расплава. Такие случайные температурные неоднородности, обусловленные распределением тепла в приповерхностном слое расплава, до момента своего «исчезновения» (за счет выравнивания температуры механизмами теплопроводности) перемещаются с поверхностью расплава. Таким образом, в процессе ЛР вдоль фронта реза со скоростью поверхности расплава перемещаются случайные температурные неоднородности, не связанные с локальным рельефом поверхности. Они могут обладать различными размерами и расстоянием друг от друга. Колебания температуры в некоторой локальной области фронта, обусловленные движением подобных неоднородностей, происходят в широком диапазоне частот.

Одновременное изменение температуры на большой области фронта связывается многими исследователями с процессом формирования регулярной шероховатости боковых кромок реза (см., например, [4]). Существуют различные представления о детальной структуре протекающих процессов. В качестве основного механизма называются: периодическая реакция окисления («волны горения» или изменение толщины оксидной пленки, затрудняющей диффузию кислорода к металлу) или периодическое «опережение» лазерного луча фазовой границей «расплав – твердый металл», что ведёт к изменению условий поглощения излучения и воздействия газа.

Таким образом, диагностика, использующая измерение теплового излучения фронта реза, может применяться для изучения динамики расплава во время ЛР. В силу нелинейной зависимости коэффициента поглощения от наклона локальной площадки данный подход позволяет определять частотные характеристики возмущений рельефа поверхности. В таком случае для исследования доступны только регулярные процессы, происходящие на фронте реза. Для получения дополнительной информации может применяться

одновременная регистрация теплового излучения из нескольких локальных областей фронта. Последующий совместный анализ данных из различных областей позволит исследовать пространственно-временные характеристики поверхностных возмущений.

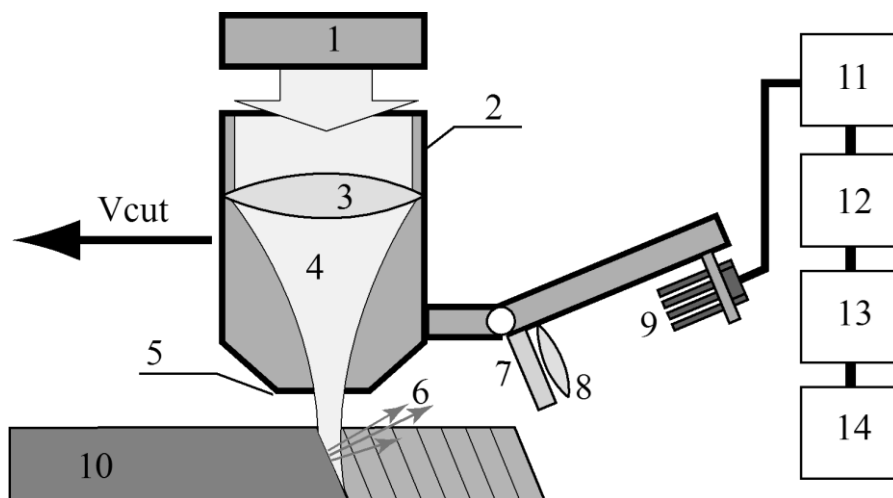


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - CO₂-лазер, 2 - режущая головка, 3 - линза головки, 4 - пучок лазерного излучения, 5 - сопло, 6 - тепловое излучение расплава, 7 - защитный фильтр, 8 - линза пирометра, 9 - торцы оптоволокон, 10 - обрабатываемый образец, 11 - блок сенсоров K1713-05, 12 - блок предварительного усиления, 13 - АЦП, 14 - компьютерная обработка цифровых сигналов.

Для изучения пространственно-временной динамики расплава путем анализа теплового излучения из зоны резки было разработано и сконструировано диагностическое измерительное оборудование, которое интегрировалось в промышленный лазерный комплекс. Предложенная схема эксперимента (Рис. 1) позволяет произвести регистрацию колебаний яркостной температуры одновременно в четырёх областях фронта реза во время проведения обычного процесса ЛР. Это достигается путем использования многоканального пирометра собственной разработки, закрепленного на лазерной головке. Области, в которых регистрировалась температура, были расположены на расстоянии примерно 0.6 мм друг под другом вдоль фронта (Рис. 2). Эксперименты проводились с использованием CO₂-лазера мощностью 1500 Вт. Для резки использовались листы мягкой стали марки Ст.3 толщиной 3 мм и 6 мм. В качестве вспомогательного газа использовался кислород. Скорость резки и давление газа варьировалось в широком диапазоне. Материал образцов, их толщина, а также вид вспомогательного газа были выбраны с учетом их широкого практического применения.

На Рис. 3 представлены типичные временные зависимости яркостной температуры в четырёх областях наблюдения. На Рис. 4 с более крупным масштабом видно, как некоторая температурная неоднородность с задержкой появляется в последовательных областях наблюдения. Для расчета корреляционных функций не важно абсолютное значение температуры, а лишь её относительное изменение и частотные характеристики. Это снижает требования к калибровке пирометра. По этой причине на осциллограммах не указываются численные значения температуры, и соответствующая ось обозначается как «условная температура».

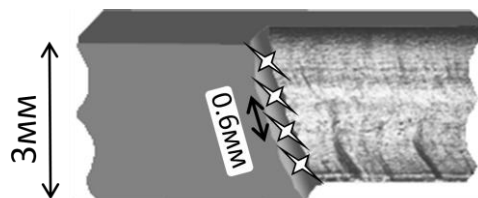


Рис. 2. Расположение областей наблюдения вдоль фронта реза (для образца толщиной 3 мм).

Для того чтобы определить характер происходящих на фронте температурных колебаний, используется аппарат автокорреляционного анализа. Массив данных был поделен на равные по длительности (примерно 10 мс) выборки, для каждой из них была рассчитана автокорреляционная функция, а затем было проведено усреднение по 49 выборкам. Показано наличие двух независимых процессов, приводящих к изменению температуры на существенно отличающихся

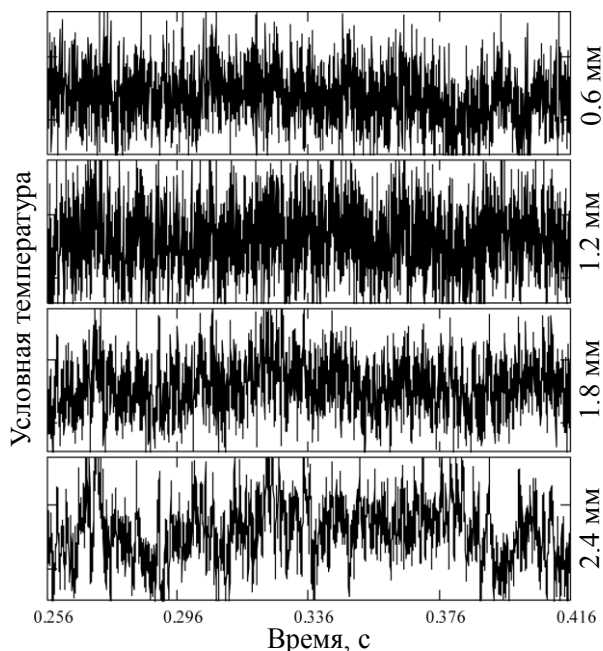


Рис. 3. Осциллограммы яркостной температуры в четырёх областях наблюдения. Расстояние от верхней кромки листа указано справа.

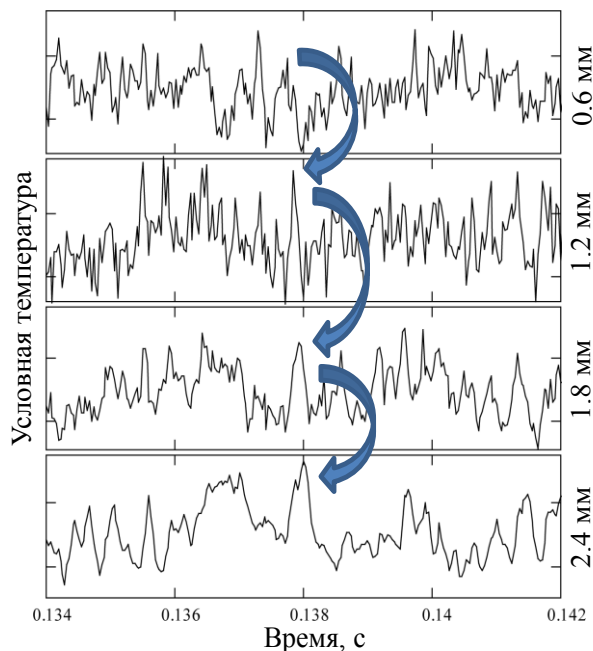


Рис. 4. Перемещение температурной неоднородности вдоль по фронту реза.

временных масштабах. Амплитуда колебаний температуры, вызванных низкочастотным процессом, связанным с образованием регулярной шероховатости боковых кромок реза, много больше, чем её изменение за счет модуляции поглощения на возмущениях рельефа. Применяя частотную фильтрацию, можно показать, что периодический низкочастотный процесс вместе с сильными гармониками ограничен сверху частотой примерно 400 Гц (на 6 мм) или 800 Гц (на 3 мм). На более высоких частотах колебания температуры обусловлены динамикой локальных возмущений рельефа или случайных температурных неоднородностей.

В главе 3 описывается методика оптической диагностики течения расплава в процессе ЛР, основанная на использовании многоканальной пирометрической регистрации теплового излучения одновременно из нескольких областей фронта реза, а также корреляционных, спектральных и статистических методов обработки данных. Приводятся результаты определения характеристик течения расплава.

Совместно анализируя температурные колебания в различных областях фронта реза, можно получить информацию о пространственно-временных характеристиках течения, в частности, скорости течения и свойствах поверхностных возмущений и волн, распространение которых ведет к локальному изменению температуры. За основу предлагаемой методики взят распространенный взаимно-корреляционный метод определения скорости. Предположим, что некоторое локальное распределение температуры на поверхности расплава, перемещаясь из одной области наблюдения в другую, сохранит в достаточной мере свою структуру, тогда, рассчитав взаимную корреляционную функцию, можно определить время, которое заняло это перемещение. Зная расстояние между областями наблюдения, можно вычислить скорость перемещения. Частотные характеристики температурного сигнала позволяют судить о пространственном масштабе неоднородностей. Их перемещение происходит либо со скоростью локальных возмущений рельефа, либо со скоростью поверхности расплава.

Поскольку вклад в регистрируемые колебания температуры могут одновременно вносить неоднородности, образованные под действием различных механизмов, при использовании традиционного широкополосного метода взаимной корреляции произойдет наложение результирующих корреляционных пиков, характеризующих запаздывание каждого возмущения. Различные регулярные поверхностные возмущения обладают различными скоростями и пространственными периодами повторения, таким образом, температурные сигналы, отображающие их распространение, имеют различные частотные характеристики. Предварительная частотная фильтрация позволяет независимо определять задержку при распространении различных поверхностных возмущений. После испытания алгоритма ширина полосы фильтрации была выбрана равной 300 Гц. Окно фильтрации последовательно сдвигалось с шагом 50 Гц. Таким образом взаимная корреляционная функция рассчитывается для множества перекрывающихся частотных диапазонов. Разработанный алгоритм также включает в себя последующее усреднение корреляционных функций по множеству реализаций.

На Рис. 5 (а) для одного экспериментального реза представлены полученные оценки скорости перемещения поверхностных неоднородностей при использовании предварительной частотной фильтрации в различных частотных диапазонах. На частотах выше 4 кГц значительно снижалась степень корреляции, и результаты нельзя было считать достоверными. Характерно наличие широкого набора скоростей перемещения неоднородностей. Одни и те же значения скорости могут обнаруживаться в разных частотных диапазонах.

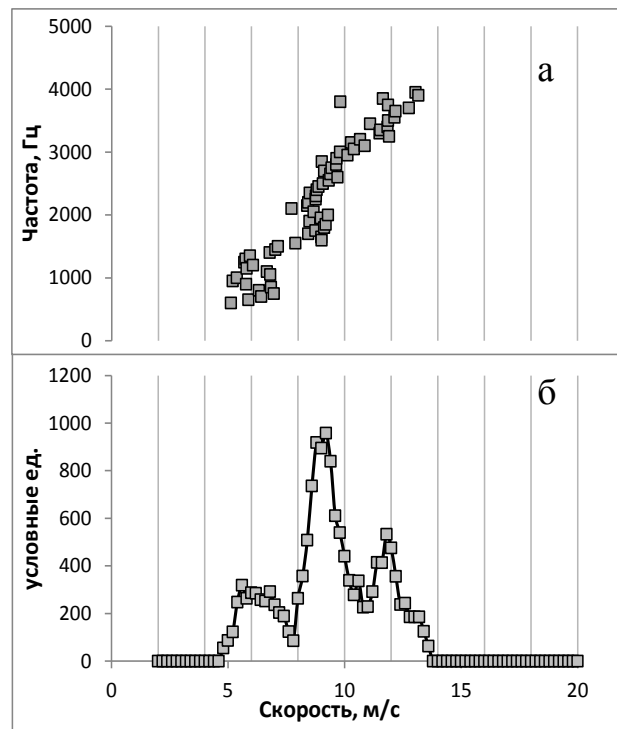


Рис. 5. а) Скорости перемещения температурных неоднородностей, определённые в различных частотных диапазонах. Сталь 6 мм, $P=0.45$ МПа, $V_{\text{cut}}=27$ мм/с. б) Статистическое распределение скоростей, построенное по данным зависимости $v(f)$.

По данным, полученным в большинстве экспериментов, имеется одна или несколько частотных областей, превышающих по ширине полосу фильтрации, в которых определяются близкие значения скорости. При значительной ширине таких областей соответствующие им точки на графике $v(f)$ формируют вытянутые вертикальные группы. Определение постоянной скорости в диапазоне частот более широком, чем полоса фильтрации, означает, что существует некоторый набор регулярных поверхностных возмущений, которые имеют различный пространственный масштаб, но одинаковую скорость. Независимость скорости некоторого процесса от частоты говорит об отсутствии или низкой дисперсии. В соответствии с оценками, сделанными во второй главе, такими процессами могут быть: перемещение случайных температурных неоднородностей вместе с поверхностью расплава, либо длинноволновая часть каскада капиллярной турбулентности. Оба процесса обладают сплошным спектром и постоянной скоростью, близкой (или равной) скорости движения поверхности расплава. Соответствующие этим процессам вертикальные группы точек имеют характерный легко различаемый вид. Это даёт возможность использовать их для определения скорости поверхности расплава.

Наличие единственной вертикальной группы точек, охватывающей широкий частотный диапазон, свидетельствует о реализации режима стабильного течения расплава, то есть о том, что большую часть времени расплав двигался с постоянной скоростью. Наличие нескольких «вертикальных областей» постоянной скорости свидетельствует о реализации квазистационарного режима течения расплава, при котором происходит периодическая смена нескольких значений скорости его поверхности. Поскольку полученное распределение скоростей по частотам учитывает статистические характеристики течения, дискретное расположение вертикальных областей позволяет говорить о временной устойчивости таких значений скорости, то есть длительность изменения скорости расплава оказывается много меньше длительности движения с постоянной скоростью.

Для определения устойчивых значений скорости поверхности расплава был разработан и использован статистический метод. Алгоритмически метод основан на анализе частотного распределения скоростей неоднородностей $v(f)$:

подсчитывается количество точек, попадающих в некоторую окрестность значений скорости с шагом 0.1 м/с (см. Рис. 5 (б)). Физический смысл метода – определение вероятности перемещения температурных неоднородностей с определенной скоростью. Полученные таким образом скорости соответствуют вертикальным областям точек на $v(f)$.

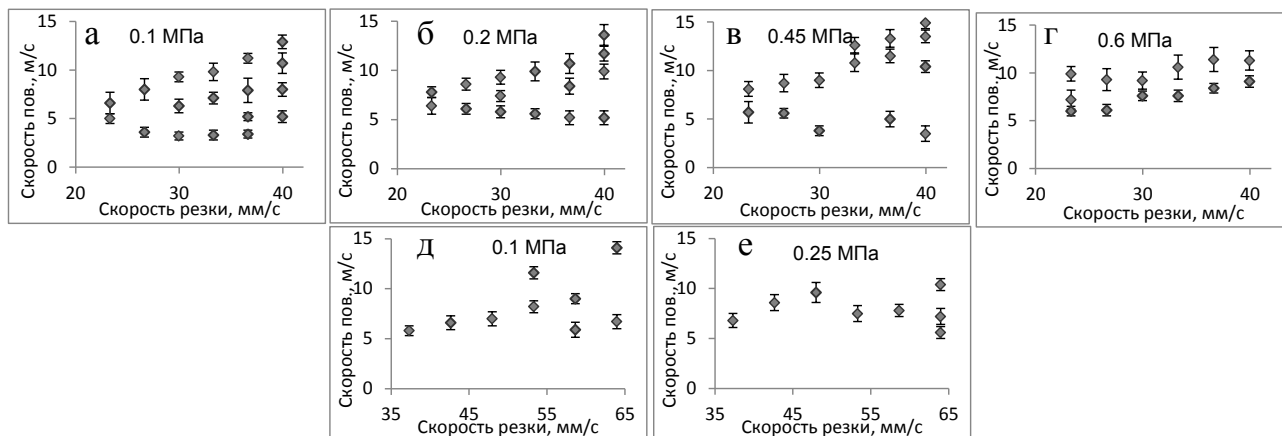


Рис. 6. Устойчивые значения скорости движения поверхности расплава в зависимости от скорости ЛР. Давление кислорода указано на графиках, толщина образца: а-г – 6 мм; д-е – 3 мм.

Устойчивые значения скорости поверхности расплава, определенные по пикам на статистических графиках, в зависимости от параметров процесса ЛР представлены на Рис. 6. Во время ЛР образцов толщиной 3 мм на скорости 48 мм/с и менее – расплав стабильно движется с постоянной скоростью. При скорости резки более 50 мм/с у потока расплава начинают регистрироваться дополнительные устойчивые значения скорости. При резке образцов толщиной 6 мм регистрируются минимум два устойчивых значения скорости. Скорость поверхности периодически изменяется, поочерёдно принимая эти значения. При использовании давлений ниже 0.6 МПа с ростом скорости резки расширяется диапазон реализующихся значений скорости поверхности, а также увеличивается количество её устойчивых значений: начинают реализовываться как более высокие, так и медленные скорости. На высоких, для фиксированной толщины металла, скоростях резки течение расплава становится менее упорядоченным. Поверхность расплава чаще меняет свою скорость, статистический вес её промежуточных значений увеличивается, что приводит к регистрации их корреляционным методом. При этом разброс значений реализующихся скоростей наибольший.

Зная скорость перемещения и частоту следования регулярных неоднородностей, их пространственный период повторения можно оценить как $\Lambda(v) = v/f$. График $\Lambda(v)$ (Рис. 7) можно интерпретировать, как пространство параметров «скорость – период повторения» образующихся поверхностных неоднородностей. Наличие горизонтальной группы точек на пространстве параметров $\Lambda(v)$ свидетельствует о стабильном возбуждении в процессе ЛР волнового движения поверхности с фиксированной длиной волны. Выявление множества скоростей может объясняться как ускорением волн газовым потоком, так и нелинейными эффектами: зависимостью скорости волны от амплитуды, переменной скоростью вдоль профиля волны, распадом волны на моды, имеющие разные скорости. На Рис. 9 (точками) показаны зависимости длины волны образующихся волн от скорости резки при различных параметрах процесса ЛР. Планками погрешности обозначен разброс в горизонтальных группах точек на $\Lambda(v)$. Во всех проведенных экспериментах длина волны слабо зависит от скорости резки и давления режущего газа и составляет 2-2.8 мм в случае резки образцов толщиной 3 мм; и 2.7-4 мм в случае резки образцов толщиной 6 мм.

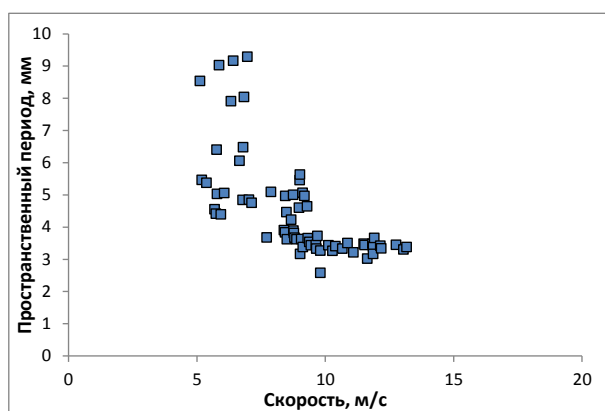


Рис. 7. Пространство параметров $\Lambda(v)$ поверхностных возмущений. Условия те же, что и на Рис. 5.

На скоростях резки, близких к максимальной для данной толщины металла, расположение точек в представлении $\Lambda(v)$ теряет упорядоченность. Перестают распознаваться вертикальная и горизонтальная группы точек. Нестабильными становятся характеристики как течения расплава, так и волнового движения его поверхности.

Предложенные методы позволяют определять важные характеристики течения расплава (скорость потока и параметры гидродинамических волн на его поверхности) по данным, получаемым непосредственно в процессе ЛР. Их вычисление может быть реализовано в режиме реального времени для использования в приборах и средствах контроля качества выполнения технологических операций. Таким образом, описанная методика сбора

информации о процессах, происходящих в зоне воздействия лазерного излучения на металл, а также методы обработки полученной информации, могут применяться при разработке аппаратной и программной частей спецоборудования для устройств квантовой электроники.

В главе 4 проводится расчет длин волн, возбуждаемых на поверхности расплава, с использованием аналитической модели движения жидкой пленки, увлекаемой потоком газа.

Для анализа течения расплава металла, увлекаемого потоком газа, в процессе ЛР предложено использовать интегральную модель [5], учитывающую образование гидродинамической неустойчивости. Воздействие газа на устойчивость жидкой пленки учитывается через пульсации давления и касательного напряжения на межфазной поверхности. Оценка пульсаций проводилась по “модели D*” [6].

Невозмущенные компоненты градиента давления и касательного напряжения, в зависимости от давления вспомогательного газа, оценивались в соответствии с [7]. Исследование дисперсионных зависимостей показывает наличие локального максимума инкремента, соответствующего волнам максимального роста. Для типичных условий ЛР максимальным инкрементом обладают волны длиной порядка 100 мкм. При этом время развития неустойчивости составляет несколько мкс, что существенно меньше характерного времени ЛР τ^* .

На Рис. 8 изображены зависимости фазовой скорости c и инкремента β от длины волны λ . Видно, что зависимость $\lambda(c)$ – двузначна, то есть может существовать другая волна, одновременно перемещающаяся с той же скоростью, что и у волны максимального роста. Из теории волн известно, что взаимодействие между волнами, имеющими одинаковую скорость, сильнее,

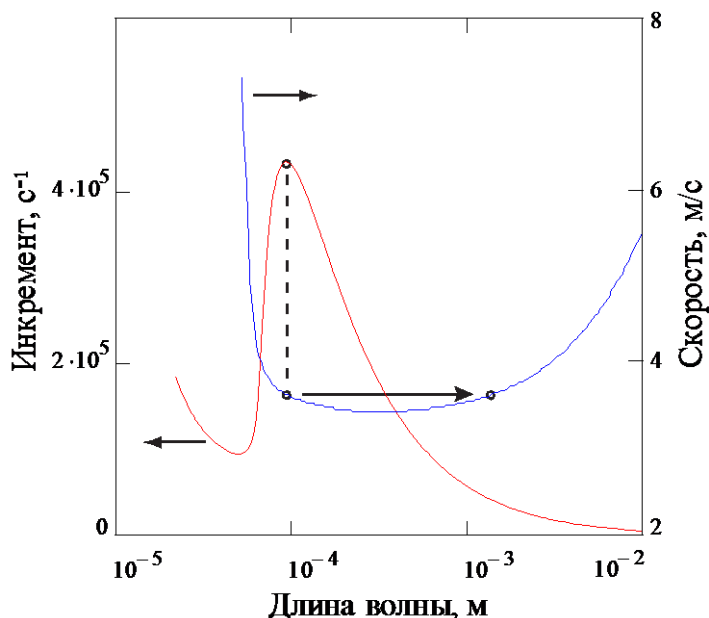


Рис. 8. Дисперсионные кривые и схема возбуждения длинноволновой моды при синхронизме скоростей с волнами максимального роста. Сталь 3 мм, $p = 0.25$ МПа, $V_{\text{cut}} = 53$ мм/с.

чем между волнами, движущимися с различными скоростями [8]. В таком случае можно рассмотреть механизм усиления длинноволновой моды, находящейся в состоянии виртуального резонанса с волной максимального роста, вызванного равенством их скоростей. Схема возбуждения длинноволновой моды показана на Рис. 8. Важно отметить, что время развития неустойчивости резонансной моды также меньше τ^* .

Используя механизм синхронизма волн, по полученным дисперсионным зависимостям были определены характеристики длинноволновых мод. На Рис. 9 совместно представлены зависимости от скорости резки длин волн расчетных резонансных мод (линии), и длин волн, экспериментально полученных корреляционным методом (точки). При использовании давления до

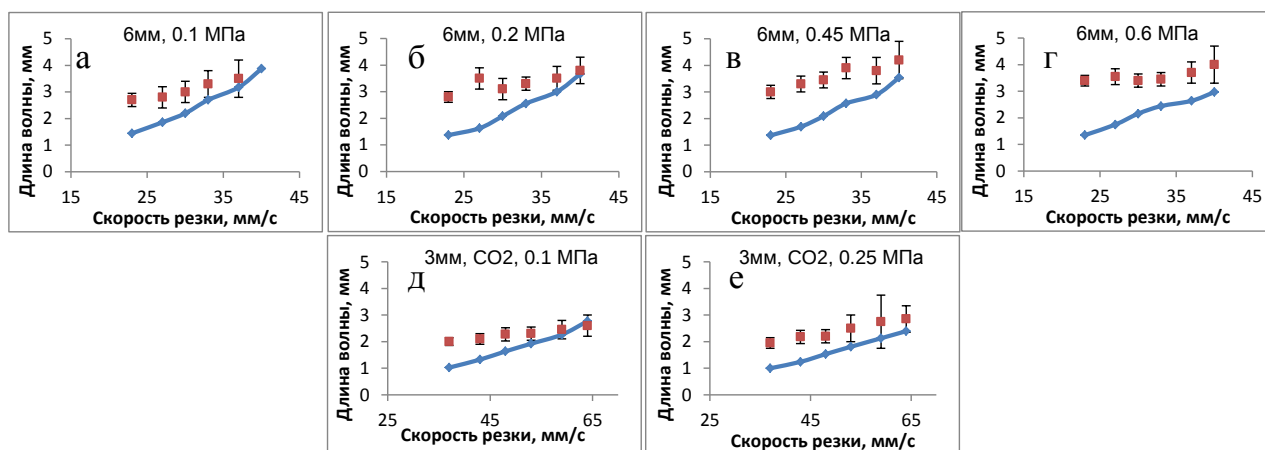


Рис. 9. Длина волны в зависимости от скорости ЛР. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) данные. Толщина образца: а-г – 6 мм; д,е – 3 мм. Давление кислорода указано на графиках.

0.25 МПа и близких к максимальным скоростям резки, экспериментальные и расчетные величины совпадают в пределах погрешности как на образцах толщиной 3 мм, так и 6 мм. В остальных случаях расчетные длины волн меньше, чем экспериментально полученные. Различия увеличиваются с замедлением скорости резки. На минимальной скорости резки расчетные и экспериментальные длины отличаются примерно в два раза.

Результаты, полученные с использованием гидродинамической модели течения жидкой пленки, увлекаемой турбулентным потоком газа, при учете механизма резонансного усиления длинноволновой моды, находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментально полученными данными. Проведенные расчеты показывают возможность развития неустойчивости течения расплава с образованием волн миллиметрового диапазона в процессе

ЛР с использованием вспомогательного газа. Также, они согласуются с интерпретацией экспериментальных данных как проявления волнового движения поверхности потока расплава.

Основные выводы (и результаты работы)

1. Показано, что анализ теплового излучения фронта реза может применяться для изучения динамики расплава в процессе ЛР. В силу нелинейной зависимости коэффициента поглощения от наклона локальной площадки данный подход применим для определения частотных характеристик возмущений рельефа поверхности. С его помощью могут исследоваться регулярные процессы, происходящие на фронте реза.
2. Разработано и сконструировано диагностическое измерительное оборудование, позволяющее регистрировать колебания яркостной температуры одновременно в четырех областях фронта реза во время проведения ЛР.
3. Проведена экспериментальная резка стальных пластин толщиной 3 и 6 мм излучением CO_2 -лазера в потоке кислорода с одновременной регистрацией яркостной температуры. Параметры процесса ЛР изменялись в широком диапазоне.
4. Проведен автокорреляционный анализ полученных данных. Показано, что пульсации яркостной температуры в локальных областях фронта реза в процессе ЛР металлов, происходящие с частотами выше определенного «порогового» значения, отображают перемещение локальных возмущений рельефа или случайных температурных неоднородностей. Пороговая частота зависит от условий ЛР и связана с процессами образования регулярной шероховатости.
5. Корреляционным методом с предварительной частотной фильтрацией определены скорости перемещения вдоль фронта реза поверхностных неоднородностей температуры и рельефа. Показано, что применение частотной фильтрации позволяет независимо определять параметры различных регулярных поверхностных неоднородностей.
6. Установлено, что стабильному движению поверхности расплава соответствует выявление корреляционным методом постоянной скорости

неоднородностей в диапазоне частот более широком, чем полоса фильтрации. Это происходит за счет регистрации параметров широкополосных шумовых процессов: перемещения вместе с поверхностью расплава случайных температурных неоднородностей и длинных капиллярных волн.

7. Разработана оригинальная статистическая методика определения устойчивых значений скорости поверхности расплава по данным корреляционного метода. С помощью методики установлены зависимости таких скоростей от параметров процесса ЛР. Показано, что в зависимости от параметров процесса ЛР могут устанавливаться квазистационарные режимы течения расплава, при которых происходит периодическая смена нескольких устойчивых значений скорости перемещения его поверхности.
8. При ЛР образцов низкоуглеродистой стали в потоке кислорода излучением CO_2 -лазера с плотностью мощности 10^6 Вт/см^2 наблюдается: от 1 до 3 устойчивых значения скорости поверхности в случае резки образцов толщиной 3 мм (давление режущего газа 0.1 или 0.25 МПа, скорость резки от 37 до 64 мм/с), и от 2 до 4 устойчивых значений в случае резки образцов толщиной 6 мм (давление 0.1-0.6 МПа, скорости резки от 23 до 40 мм/с).
9. В процессе газолазерной резки стали на поверхности потока расплава развиваются гидродинамические волны, длина волны которых слабо зависит от скорости резки и давления режущего газа, и составляет 2-2.8 мм в случае резки образцов толщиной 3 мм; и 2.7-4 мм в случае резки образцов толщиной 6 мм.
10. Показано, что на высоких (для фиксированной толщины металла) скоростях резки характеристики течения расплава и гидродинамических волн на его поверхности становятся нестабильными при одинаковых значениях прочих параметров процесса ЛР.
11. Разработанные методы сбора данных в процессе ЛР, а также их последующей обработки могут использоваться при создании приборов и средств контроля качества выполнения технологических операций. Они могут применяться в режиме реального времени в составе спецоборудования для устройств квантовой электроники.

12. Проведена оценка параметров течения расплава вдоль фронта реза на основе гидродинамической модели течения жидкой пленки, увлекаемой турбулентным потоком газа, при учете вариации касательного и нормального напряжений вдоль волнистой поверхности и с использованием механизма резонансного усиления длинноволновой моды. Показано, что в условиях ЛР металлов с использованием вспомогательного газа возможно развитие гидродинамических неустойчивостей с образованием волн миллиметрового диапазона. Расчет по модели предсказывает возбуждение волн: в случае образцов толщиной 3 мм – с длиной волны 1-2.5 мм, а в случае образцов 6 мм – с длиной волны 1.5-4 мм, в зависимости от скорости резки и давления режущего газа. Совпадение расчетных результатов с экспериментальными данными наблюдается при использовании высоких (для фиксированной толщины металла) скоростей резки совместно с низким или умеренным давлением режущего газа

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях из перечня ВАК

- A1. Дубров А.В., Завалов Ю.Н., Дубров В.Д. Оценка скорости выноса расплава в технологии лазерной резки металлов оптическим корреляционным методом // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 11. С. 87-94.
- A2. Dubrov A.V., Zavalov Y.N., Dubrov V.D., Grezev A.N., Grezev N.V., Makarova E.S., Dubrovin N.G. Spectrum of temperature pulsations of the melt in gas-assisted cutting with fiber laser // Optical Engineering. 2012. Vol.51 (9), P. 094301. doi:10.1117/1.OE.51.9.094301.
- A3. Dubrov A.V., Dubrov V.D., Zavalov Y.N., Makarova E.S., Dubrovin N.G. Pyrometry diagnostic in laser cutting technology // LASER SOURCES AND APPLICATIONS, Editor(s): Graf, T; Mackenzie, JI; Jelinkova, H; Powell, J, Proceedings of SPIE, v.8433, p.84330W (2012). Accession Number: WOS:000305709300027.
- A4. Dubrov A.V., Dubrov V.D., Zavalov Y.N., Panchenko V.Y. Application of optical pyrometry for on-line monitoring in laser-cutting technologies // Applied Physics B. 2011. Vol.105, N. 3, P. 537-543. doi:10.1007/s00340-011-4611-3.

Прочие публикации

- A5. Дубров А.В., Завалов Ю.Н., Дубров В.Д.. Современные методы исследования физических явлений при взаимодействии лазерного излучения с веществом в процессах термических лазерных технологий // Современные лазерно-информационные технологии : кол. моногр. под ред. В.Я. Панченко, Ф.В. Лебедева – М.: Интерконтакт Наука, 2014. С. 430–454.
- A6. Zavalov Y.N., Dubrov A.V., Dubrov V.D., Dubrovin, N.G., Makarova, E.S., Antonov, A.N. The technique of measuring the velocity of melt removal in gas-laser cutting technology using multi-channel pyrometer // In: International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), 9-13 Sept. 2013, Sudak, pp. 98-99 (2013). ISSN:2160-1518, doi: 10.1109/CAOL.2013.6657541.
- A7. Dubrov A.V., Zavalov Y.N., Dubrov V.D. Pyrometric Monitoring of Gas-Assisted Cutting of Steel Using Fiber Laser // In: Proceedings of Advanced Laser Technologies (ALT12), Sept. 2-6, 2012, Thun, v.1, p.47 (2012). doi: 10.12684/alt.1.47.
- A8. Dubrov A.V., Dubrov V.D., Zavalov Y.N. Thermocapillary effects in CO₂ laser cutting of metals // In: 11-th Int. Conf. on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling LFNМ*2011, Sept. 5-8, 2011, Kharkov, pp.1-2 (2011). ISBN 978-1-61284-811-2, doi: 10.1109/LFNМ.2011.6144968.
- A9. Golubev V.S., Dubrov A.V., Zavalov Y.N., Dubrov V.D., Dubrovin N.G. Diagnostics of laser radiance penetration into material by multi-channel pyrometer // Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), 2010, Sevastopol, P. 182 – 184 (2011). 978-1-4244-7043-3, doi: 10.1109/CAOL.2010.5634219.
- A10. Дубров А.В., Завалов Ю.Н., Дубров В.Д. Исследования процессов воздействия лазерного излучения на металл с помощью многоканального пирометра // В сб. Труды X Межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”, Москва, 2009, КДУ, С. 69-72.
- A11. Дубров А.В., Завалов Ю.Н., Дубров В.Д. Алгоритмы оптимизации для систем мониторинга качества лазерных технологических процессов // В сб. Труды X Межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”, Москва, 2009, КДУ, С. 75-80.
- A12. Дубров А.В., Завалов Ю.Н. Он-лайн диагностика процесса газолазерной

резки металлов с помощью многоканального пирометра // В сб. Труды IX Межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”, Москва, 2008, КДУ, С.141-144.

Цитированная литература

1. Голубев В.С. О механизмах удаления расплава при газолазерной резке материалов – Е-принт №3 – Шатура:ИПЛИТ РАН, 2004 – 109 с.
2. Мирзоев Ф. Х., Панченко В. Я., Шелепин Л. А. Лазерное управление процессами в твердом теле //Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – №. 1. – С. 3-32.
3. Kaplan A. F. H. Absorptivity modulation on wavy molten steel surfaces: The influence of laser wavelength and angle of incidence //Applied Physics Letters. – 2012. – Т. 101. – №. 15. – С. 151605.
4. Sforza P., de Blasiis D. On-line optical monitoring system for arc welding //NDT & E International. – 2002. – Т. 35. – №. 1. – С. 37-43.
5. Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow //International journal of heat and mass transfer. – 1995. – Т. 38. – №. 11. – С. 2127-2134.
6. Asali J. C., Hanratty T. J. Ripples generated on a liquid film at high gas velocities //International journal of multiphase flow. – 1993. – Т. 19. – №. 2. – С. 229-243.
7. Chen K., Yao Y. L., Modi V. Gas jet–workpiece interactions in laser machining //Journal of manufacturing science and engineering. – 2000. – Т. 122. – №. 3. – С. 429-438.
8. Cheng M., Chang H. C. Competition between subharmonic and sideband secondary instabilities on a falling film //Physics of Fluids. – 1995. – Т. 7. – №. 1. – С. 34-54.