

ВЕЛИЕВ ДАВИД ЭЛМАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ
СВАРКИ МЕТАЛЛОВ**

05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Высокоэнергетические процессы и агрегаты» Набережночелнинского института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высокоэнергетические процессы и агрегаты» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ
Исрафилов Ирек Хуснемарданович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Электромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
Хасанов Зимфир Махмутович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии машиностроительных производств имени Ф.С.Юнусова» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева — КАИ»
Янбаев Руслан Мискадесович

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита состоится «26» мая 2017 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.081.31 в ФГАОУ ВО Казанский (Приволжский) федеральный университет по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета, УЛК-5, ауд.309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Набережночелнинского института Казанского (Приволжского) федерального университета.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, диссертационный совет Д 212.081.31.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



кандидат техн. наук, доцент
Мавлеев Ильдус Рифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Автоматизация технологических процессов лазерной термообработки обеспечивает стабилизацию и требуемые значения их параметров, что позволяет получать заданные показатели качества деталей. Для проектирования технологического процесса и выбора режимов обработки металлов необходимо знание основных закономерностей и взаимосвязи параметров, определяющих процесс сварки. Этого можно достичь с помощью анализа звуковых колебаний из зоны взаимодействия импульсного лазерного излучения с металлом.

В текущих условиях актуальными является оптимизация структуры системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом для данного технологического процесса. Для этого необходимо произвести выбор звеньев системы управления лазерным технологическим комплексом с требуемыми параметрами, обеспечивающими заданные показатели качества деталей.

Использование лазера как эффективного технологического инструмента ограничено неудовлетворительными точностными характеристиками систем управления лазерным технологическим комплексом, что обусловлено, в первую очередь, низкой информативностью параметров, измеряемых в реальном времени технологического процесса и характеризующих физико-химические процессы в зоне обработки металла.

Для решения этих задач был рассмотрен способ получения временных, частотных и энергетических параметров акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом. Полученные данные используются в отрицательной обратной связи с целью стабилизации параметров технологического процесса. Стабилизация и контроль параметров технологического процесса для получения качества сварного шва является актуальной задачей.

Объект исследования — процесс лазерной сварки металлов.

Предметом исследования является лазерный технологический комплекс сварки металлов с исследованиями и анализом новых информативных параметров, определяющих качество сварного шва и измеряемых в реальном времени.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности технологического процесса сварки металлов за счет внедрения автоматизированной системы управления технологическим комплексом.

Для достижения поставленной цели была определена **научная задача** – разработать методику и способ управления лазерным технологическим комплексом сварки металлов с использованием новых информативных параметров из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом, определяющих качество сварного шва, позволяющих повысить эффективность процесса сварки металлов.

Для достижения поставленной цели и решения поставленной задачи в работе необходимо решить следующие **вопросы**:

1. Обзор текущего состояния и развития лазерных технологических комплексов сварки, выявление особенностей технологического процесса лазерной сварки, оценка влияния параметров технологического комплекса на качество сварки металлов.

2. Выявить новые информативные параметры из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлами, влияющие на качество сварного шва, и измеряемые в реальном времени.

3. Разработать методику анализа зависимостей показателей качества сварки от параметров технологического процесса на основе измеряемых акустических сигналов из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлами.

4. Разработать метод контроля процесса лазерной сварки разнородных металлов на основе анализа их особенностей.

5. Исследовать зависимости характеристик акустических колебаний из зоны обработки от параметров технологического процесса обработки лазерным излучением металлов.

6. Исследовать структуру металлов зоны термического воздействия лазерного излучения и акустические колебания.

7. Разработать метод управления положением фокуса лазерного излучения, на основе расчета параметров движущегося источника энергии и канала лазерной подсветки стыка свариваемых изделий.

8. Провести анализ и синтез системы управления лазерного технологического комплекса на основе предложенного алгоритма работы, структурной и микропроцессорной схем.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи использованы методы спектрального анализа дискретных сигналов, математического моделирования, теории автоматического управления, системного анализа. Экспериментальные исследования по взаимодействию лазерного излучения с металлами проводились на лазерных технологических комплексах LRS-150A и ЛС-2, с последующей программной обработкой акустического сигнала и использованием методов металлографического анализа микрошлифов образцов. Результаты исследований обрабатывались с применением пакетов прикладных программ MathCAD и программного обеспечения по статистической обработке.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается полнотой и обстоятельностью анализа современного состояния исследований в области разработки лазерного технологического комплекса; корректностью выбора исходных допущений и ограничений при решении оптимизационной задачи; строгостью использования современного математического аппарата при формализации исследуемой задачи и ее решения; корректным применением, в качестве базовых, широко применяемых и хорошо апробированных практикой и экспериментом методов технологии машиностроения, системного анализа; удовлетворительным совпадением экспериментальных с расчетными данными; публикацией и апробацией основных положений работы на международном, всероссийском и отраслевом уровнях.

Научная новизна:

1. Методика обработки акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом с выявлением его временных, частотных и энергетических характеристик.

2. Методика анализа зависимостей показателей качества сварного шва от параметров измеряемых акустических сигналов для стабилизации характеристик технологического процесса.

3. Способ лазерной сварки разнородных металлов, учитывающий теплофизические характеристики свариваемых деталей и обеспечивающий заданное отклонение фокуса излучения относительно наклонной стыковой поверхности.

4. Метод контроля процесса сварки разнородных металлов на основе анализа акустических колебаний из зоны взаимодействия, позволяющий обеспечить сварку тугоплавкого и легкоплавкого металлов с повышением её качества и эффективности.

5. Метод управления положением фокуса лазерного излучения относительно сварного шва с учетом его геометрии для стабилизации его отклонения от криволинейного стыка деталей и повышения эффективности лазерной обработки.

Общетеоретическая значимость и практическая ценность.

Проведенное диссертационное исследование по разработке методики анализа и повышения эффективности управления лазерным технологическим комплексом сварки металлов было в значительной мере мотивировано и поддержано выполнением НИР «Разработка и исследование лазерно-плазменной установки и гибридной технологии обработки», ГК №14.740.11.0823 от 01.12.2010 г., Акт №1, от 10.12.2010г, Акт №2 от 24.06.2011 г., Акт №3 от 29.11.2011 г., Акт №4 от 29.06.2012 г., Акт №5 от 29.11.2012 г.

Результаты диссертационной работы внедрены и использованы в ООО «Камский завод строительных металлоконструкций» г. Набережные Челны, в АО «Центр прототипирования и внедрения отечественной робототехники» г. Набережные Челны и в учебном процессе Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика обработки зависимости временных, частотных и энергетических характеристик акустического сигнала от нестабильности параметров автоматизированного технологического комплекса.

2. Анализ зависимостей качества технологического процесса сварки от характеристик акустических колебаний из зоны обработки лазерным излучением.

3. Математическая модель функциональной зависимости распределения теплового поля в зоне воздействия лазерного излучения от параметров лазерного технологического комплекса с учетом теплофизических свойств металлов, позволяющая прогнозировать качество сварки.

4. Способ лазерной сварки разнородных металлов, обеспечивающий качество сварного шва.

5. Решение задачи контроля процесса сварки разнородных металлов, учитывающее теплофизические характеристики обрабатываемых металлов и обеспечивающее отсутствие испарения легкоплавкого металла, призванное обеспечить стабилизацию рабочих режимов лазерной сварки.

6. Методика оценки глубины обработки лазерным излучением на основе анализа характеристики акустических колебаний из зоны сварки.

7. Блок стабилизации отклонения фокуса лазерного излучения от криволинейного стыка деталей для выполнения качественного сварного шва.

8. Структурная и микропроцессорная схемы системы автоматического управления лазерным комплексом для процесса сварки на основе функциональных связей между показателями качества свариваемых деталей и технологическими параметрами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

В соответствии с паспортом научной специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)» в диссертационной работе рассмотрена методика расчета оптимальных параметров режима технологического процесса на основе математического моделирования распределения теплового поля в зоне воздействия лазерного излучения, позволяющая обеспечить заданные показатели качества на основе анализа акустических колебаний и представлены структурная и микропроцессорная схемы системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом на основе этой методики в соответствии с пунктом 1 специальности. В работе представлен способ лазерной сварки разнородных металлов, учитывающий теплофизические характеристики свариваемых металлов и заданное отклонение фокуса излучения относительно наклонной стыковой поверхности свариваемых деталей и алгоритм контроля процесса сварки разнородных металлов на основе анализа акустических колебаний из зоны взаимодействия, соответствующие пункту 5 паспорта специальности.

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в выборе и обосновании методики выполнения теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных данных, синтезе, расчете параметров и обобщении полученных данных.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в работе, опубликованы в научных статьях, докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Высокоэнергетические процессы и агрегаты», а также международных научных и научно-практических конференциях: IX Международный Симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань, 2008); Межвузовский научный сборник «Проектирование и исследование технических систем» (Набережные Челны, 2009); Международная научно-техническая и образовательная конференция «ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ» (Набережные Челны, 2010); XVII международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (Донецк, Украина, 2010); Вестник Чувашского университета (Чебоксары, 2013); VIII международная заочная научно-практическая конференция «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (Москва, 2013); Вестник Чувашского университета (Чебоксары, 2014); II международная научно-практическая конференция «Фундаментальная наука и технологии — перспективные разработки» (North Charleston, SC, USA, 2014); BEAM TECHNOLOGIES & LASER APPLICATION, Proceedings of the International scientific and technical Conference (Санкт-Петербург, 2016); «Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация» (Набережные Челны, 2016).

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит 120 страниц машинописного текста, 56 рисунков, 38 формул, 7 таблиц и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 60 наименований, трёх приложений.

Публикации. Содержащиеся в диссертации материалы нашли отражение в 11 научных трудах, в том числе в одном патенте и двух статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность задачи по сварке металлов в машиностроении, по анализу акустических сигналов из зоны обработки, по оптимизации параметров звеньев лазерного технологического комплекса (ЛТК), по анализу и синтезу системы автоматического управления (САУ) для обеспечения заданного технологического процесса (ТП), по исследованию ЛТК с обратными связями по параметрам, определяющим качество ТП, и измеряемым в реальном времени ТП. Рассмотрена цель и задачи диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, их научная новизна и практическая ценность. Представлены сведения о структуре диссертации.

В первой главе проведен обзор по применению лазерной сварки металлов с выявлением особенностей этого ТП, дана характеристика решаемой задачи, изложены предпосылки и необходимость исследований поставленной задачи, сформулированы цели, и определены пути ее достижения.

Обеспечение требуемых показателей качества при лазерной термообработке металлов определяется в первую очередь такими параметрами лазерных технологических комплексов, как плотность мощности лазерного излучения, температура зоны взаимодействия (ЗВ) лазерного излучения с металлом, скорость перемещения лазерного луча, физико-химические свойства металла.

В текущих условиях актуальными является оптимизация структуры САУ ЛТК для данного ТП, выбор звеньев ЛТК с требуемыми параметрами, обеспечивающими заданные показатели качества.

Использование лазера как эффективного технологического инструмента ограничено неудовлетворительными точностными характеристиками систем управления ЛТК, что обусловлено, в первую очередь, низкой информативностью параметров, измеряемых в реальном времени ТП и характеризующих физико-химические процессы в зоне обработки металла.

Во второй главе рассмотрена методика получения и анализа временных, частотных и энергетических параметров акустического сигнала из зоны взаимодействия ЛИ с металлом на примере единичного лазерного импульса.

При взаимодействии с металлом лазерный импульс поглощается в узкой приповерхностной зоне мишени, нагрев которой сопровождается фазовыми превращениями (рисунок 1).

Каждый режим термообработки металлов характеризуется значением плотности энергии ЛИ и параметрами ТП, которые определяют показатели качества (ПК). В качестве сигналов обратной связи АСУ ЛТК сварки металлов обычно используются плотность энергии ЛИ, температура и точность позиционирования фокуса относительно стыка.

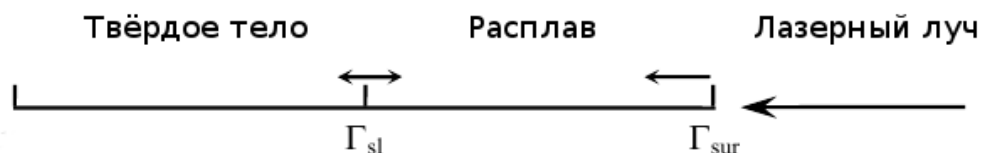


Рисунок 1. Схема воздействия лазерного излучения с металлом

Возникающий при лазерной обработке акустический эффект обусловлен различными физическими механизмами, ответственными за изменение удельного объема вещества при поглощении излучения: нагрев вещества, фазовые переходы

первого рода. Пример сигнала, снимаемого датчиком представлен рисунке 2. Такой акустический сигнал может быть использован как дополнительный информативный параметр, позволяющий повысить эффективность процесса лазерной обработки.

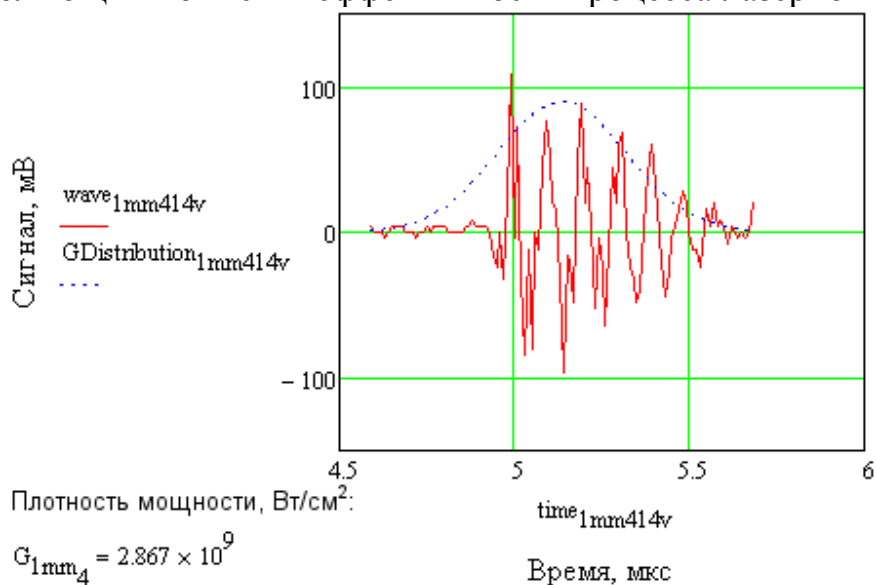


Рисунок 2. Временная зависимость амплитуды сигнала и поглощенная энергия в относительных единицах (штриховые линии) в Ст45 при диаметре излучения 1 мм и плотности мощности излучения $G = 2.87 \cdot 10^9$ Вт/см²

Спектральная плотность единичного акустического сигнала при лазерной термообработке металлов в общем случае является комплексной функцией, включающей в себя совокупность гармоник, с различной амплитудой и фазой. Применительно к процессу генерации звука при лазерной обработке, наибольший интерес представляет амплитуда сигнала. Она характеризует плотность энергии импульса лазерного излучения и поэтому в данной работе для анализа результатов исследований рассматривались амплитудные спектры звуковых сигналов. Оценка зависимости амплитуды сигнала показала, что четырехкратное повышение плотности энергии приводит к двукратному увеличению амплитуды снимаемого сигнала. Для проведения дальнейшего сравнительного анализа сигналов при различных параметрах обработки необходимо из исходного акустического сигнала определить его временные и частотные характеристики. К ним относятся временная функция сигнала, его спектральная плотность и энергетический спектр. По этим характеристикам можно определить следующие параметры сигнала, определяющие показатели качества технологического процесса: длительность; ширина спектра, особые точки функции спектра, значения частот гармонических составляющих; и энергия сигнала.

Амплитудный спектр типичного сигнала из зоны взаимодействия имеет характерный вид затухающей колеблющейся функции с главным лепестком, в котором сосредоточена основная часть энергии сигнала, на фоне других сигналов и шумов (рисунок 3). При анализе сигнала из зоны обработки основное требование предъявлялось к необходимости обнаружить наличие информационного сигнала на фоне других сигналов и шумов, поэтому перед исследованием была проведена фильтрация снятого сигнала на основе дискретного преобразования Фурье.



Рисунок 3. Амплитудный спектр сигнала

Рассмотренная методика была использована для программного анализа снимаемых во время лазерной обработки акустических колебаний. Исходный код программы анализа представлен в приложении Б диссертации.

В третьей главе для интерпретации полученных экспериментальных данных по разработанной методике был проведен регрессионный анализ и выявлены зависимости амплитуды и частоты сигнала от плотности мощности лазерного излучения (рисунки 4 и 5). Проведен анализ ТП лазерной сварки разнородных металлов, предложен метод контроля температуры легкоплавкого металла, разработана методика оценки глубины обработки ЛИ.

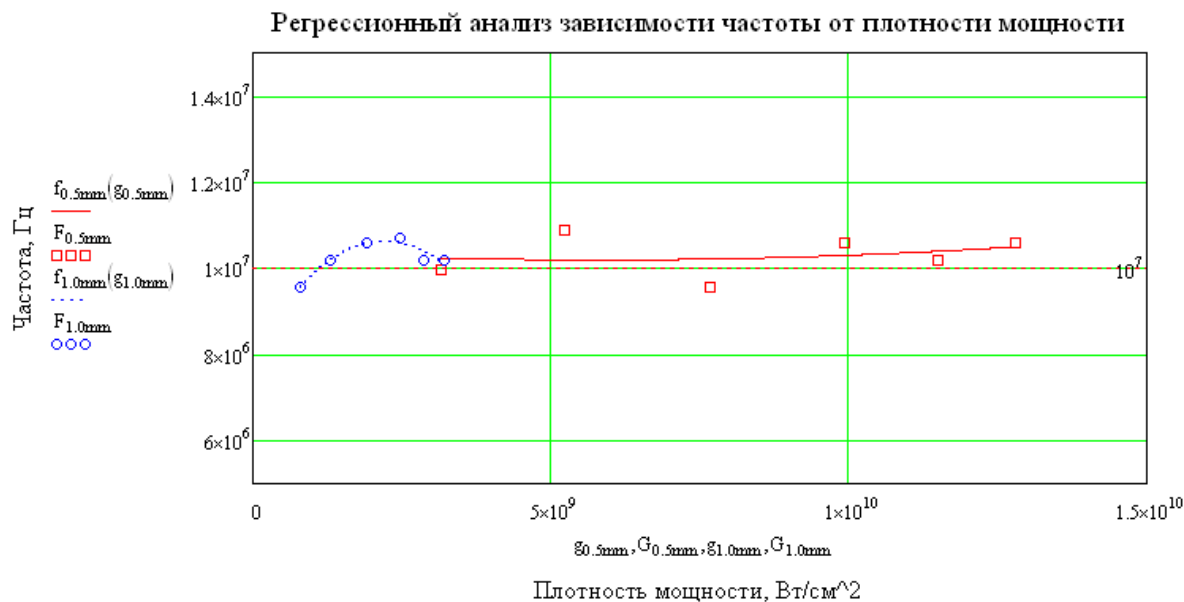


Рисунок 4. График регрессионного анализа зависимости частоты от плотности мощности

Как показал анализ, изменение плотности мощности излучения практически никак не сказывается на частоте акустических колебаний, ее значение колеблется в пределах одной частоты. Амплитуда, в отличие от частоты, напрямую зависит от

плотности мощности. Подобные зависимости частоты и амплитуды согласуются с математическими расчетами и численным моделированием.

Металлографические исследования зоны взаимодействия ЛИ с металлами показали, что зона имеет в сечении сегментную форму. В результате экспериментальных исследований влияния ЛИ на фазовые превращения в металлах, выявлено, что форма зоны воздействия ЛИ мощностью 1 кВт при скорости перемещения 1200 мм/мин. в стали У8 и цирконии имеет сегментный характер с центром круга O_1 и малую сегментную зону с центром круга O_2 .

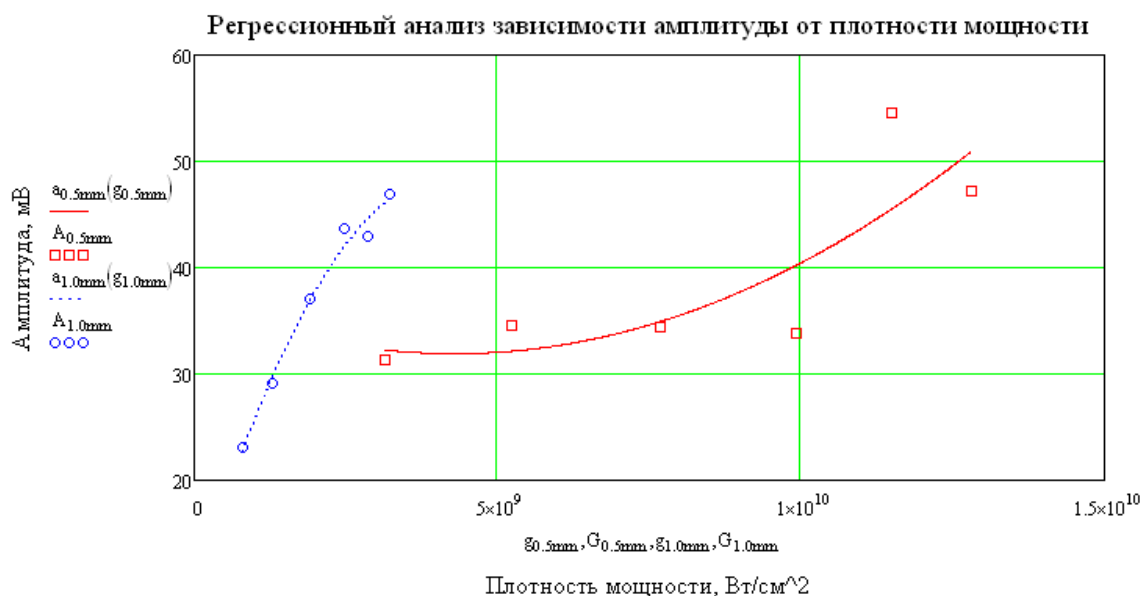


Рисунок 5. График регрессионного анализ зависимости амплитуды от плотности мощности

Наличие второй сегментной зоны можно объяснить либо началом возникновения кинжального проплавления в металле, либо возникновением вторичного источника энергии за счет окислительных процессов с выделением теплоты. Характер зон термического воздействия не зависит от энергии ЛИ, а величина второй зоны зависит от физико-химических свойств металлов. Цирконий является химически активным металлом.

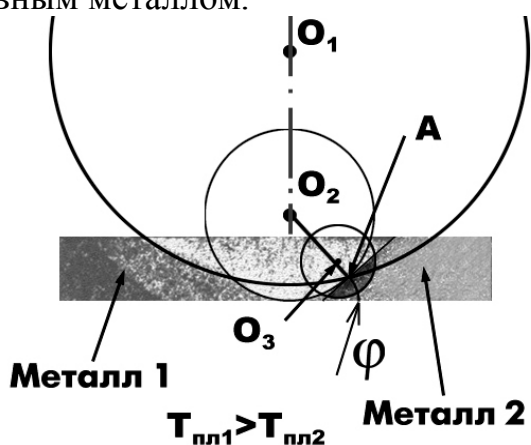


Рисунок 6. Модель схемы сварки разнородных металлов

Из анализа характера зоны термического воздействия ЛИ следует, что сварка разнородных металлов должна осуществляться подачей энергии на тугоплавкий металл и форма стыковой поверхности должна повторять форму зоны термического

влияния (ЗТВ). На практике целесообразней стыковую поверхность делать плоской, исходя из экономических соображений. Это связано с различием температур плавления, в частности, температура плавления молибдена равна 2620 °С, а стали – 1510 °С. Поэтому для получения сварного шва необходимо поднять плотность энергии, чтобы расплавить молибден, при этом происходит испарение стали. Для исключения этого эффекта необходимо использовать наклон стыковой плоскости свариваемых деталей.

Выполнив плоскость сварного шва наклонной на угол по касательной к сегменту зоны термического воздействия, можно обеспечить расплав тугоплавкого металла, а за счет теплопередачи происходит расплав легкоплавкого металла.

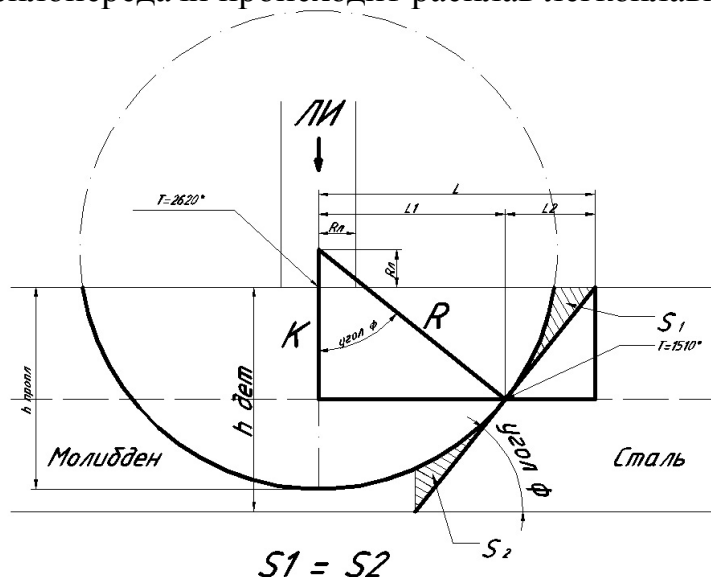


Рисунок 7. Геометрия стыкового соединения при сварке молибдена и стали

ЛИ подается на более тугоплавкий молибден ($T_{пл}=2620$ °С). Температура плавления стали составляет 1510 градусов Цельсия. h – толщина деталей. Угол φ и смещение лазерного излучения должны быть подобраны таким образом, чтобы соблюдалось равенство площадей $S_1=S_2$, а температура в середине по глубине стыкового соединения была равна температуре плавления второго свариваемого металла, в данном случае – стали ($T_{пл}=1510$ °С). Равенство площадей $S_1=S_2$ обеспечит равномерный проплав стали.

Выполнив расчёт, были получены формулы для угла наклона стыкового соединения φ и смещения лазерного излучения L . По данному способу сварки зарегистрирован патент № 2415739 (приложение В диссертации).

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\frac{h_{дет}}{2} + R_{л}}{\frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_T \cdot T_K} \cdot \ln \frac{R_{л} + \frac{\alpha}{v_{св}} + R_{л}}{r_{л}}} \right) \quad (1)$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_T \cdot T_K} \cdot \ln \frac{R_{л} + \frac{\alpha}{v_{св}} + R_{л}}{r_{л}} \right)^2 - \left(\frac{h_{дет}}{2} + R_{л} \right)^2} + \frac{h_{дет}}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$



Рисунок 8. Фотография сварного шва образцов из молибдена и стали (оптическое увеличение в 200 раз)



Рисунок 9. Фотография сварного шва образцов из молибдена и стали (оптическое увеличение в 500 раз)

Для выявления влияния глубины обработки лазерным излучением на характеристики ультразвуковых колебаний разработана методика количественной оценки глубины обработки, основанная на том, что с ростом массы пульсирующей области расплава в зоне обработки падает его собственная резонансная частота.

В четвертой главе рассмотрены энергетические процессы в зоне обработки ЛИ и структура акустических колебаний из ЗВ. Представлена математическая модель температурного поля в зоне взаимодействия. Выполнен расчет движущегося источника нагрева и канала лазерной подсветки. Предложена методика оптимизации структуры системы автоматического управления ЛТК на основании полученных результатов, выполнен синтез лазерного технологического комплекса. Разработана структурная схема ЛТК, представлена микропроцессорная система и алгоритм обработки данных в режиме реального времени.

Исследования структуры акустических колебаний и энергетических процессов в зоне взаимодействия ЛИ с металлом показали, что увеличение пикового значения поглощаемой интенсивности лазерного излучения и наличие испарительного процесса сопровождается ростом давления акустического сигнала более чем на порядок. При сварке разнородных металлов контроль обеспечения отсутствия испарения легкоплавкого металла может быть обеспечен анализом значения давления акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом в режиме реального времени. Оценка амплитуды сигнала в процессе сварки позволяет определить наличие испарительного процесса и автоматически изменить расстояние от стыковой плоскости на более тугоплавком металле с целью понижения температуры легкоплавкого металла и исключения его испарения.

На основе заданных параметров ТП обработки лазерным излучением металла Сталь 45 была разработана математическая модель взаимодействия излучения с металлом.

Расчитанное температурное поле в зоне термического воздействия показано объемным графиком на рисунке 10. Здесь представлена зависимость температуры в центре пятна нагрева от глубины Z и от времени T . Температура плавления металла составляет 1500 градусов Цельсия и представлена на трехмерном графике горизонтальной плоскостью. Можно видеть, что при данных условиях обработки,

вся температура, представленная на графике областью выше горизонтальной плоскости температуры плавления, будет представлять собой расплавленный материал в зоне взаимодействия.

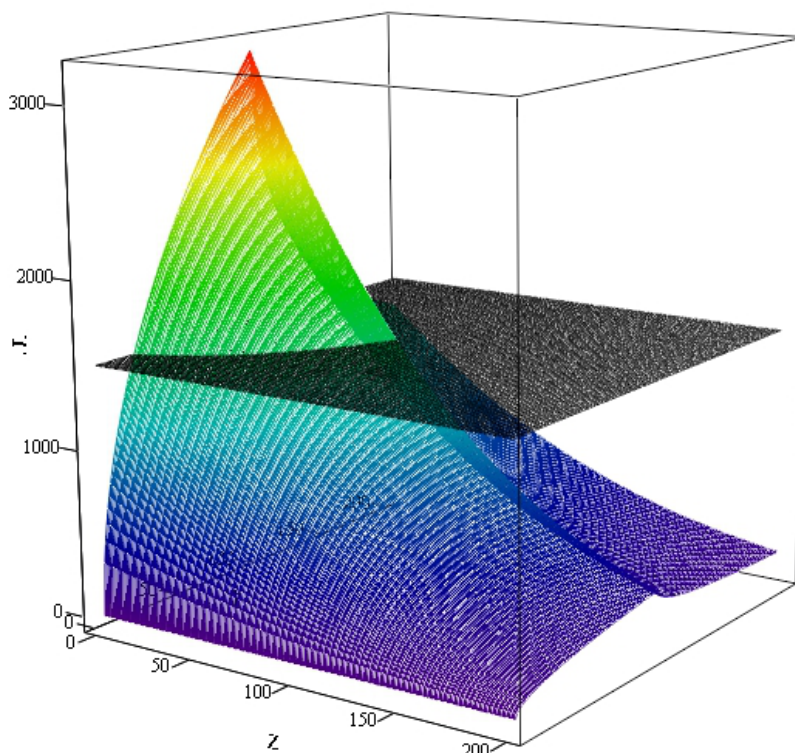


Рисунок 10. Температурное поле в зоне термического воздействия

Зависимость частоты акустических колебаний от плотности энергии при лазерной термообработке металлов позволяет в реальном времени контролировать температуру в зоне термического влияния. Заданные показатели качества обеспечиваются путем сравнения амплитудного спектра снимаемого во время технологического процесса сигнала со спектром, полученным на этапе технологической подготовки производства. На основе такого способа контроля температуры разработана блок-схема алгоритма работы системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом.

Обеспечение качества лазерной сварки требует контроля не только энергетических параметров излучения, но и положения фокусного пятна. Для этого по разработанной методике были рассчитаны параметры активной оптико-электронной системы для подсистемы регулировки положения фокуса относительно шва с лазерной подсветкой шва, построена модель канала управления с учетом теплофизических явлений, происходящих в зоне сварки.

Существенное значение при обработке ЛИ играет стабильность параметров ЛТК. Здесь необходимо рассматривать ЛТК как совокупность взаимодействующих между собой звеньев сложной системы. Это оптический квантовый генератор, оптическая система, среда пропускания лазерного излучения, обрабатываемая деталь и механизм ее перемещения.

Структурная схема САУ (рисунок 11) включает в себя следующие подсистемы:

Подсистема регулировки температуры зоны сварки: 1 — оптический квантовый генератор; 2 — оптическая система; 3 — устройство перемещения луча; 4

— инертная среда; 5 — деталь; 6 — датчики (датчик температуры); 7 — регуляторы (блок формирования управляющего сигнала по температуре); 8 — блок питания.

Подсистема регулировки положения фокуса относительно шва: 3 — устройство перемещения луча; 6 — датчики (фотоприемник положения фокуса); 7 — регулятор (регуляторы) положения фокуса.

Подсистемы программного управления перемещением ЛИ относительно сварного шва: 9 — привод перемещения оптической системы; 10 — привод перемещения детали.

Подсистема контроля процесса обработки на основе анализа звуковых колебаний: 5 — деталь; 6 — датчики (пьезокристаллический приемник акустических колебаний); 7 — регуляторы (блок формирования управляющего сигнала по выделенной огибающей акустического сигнала).

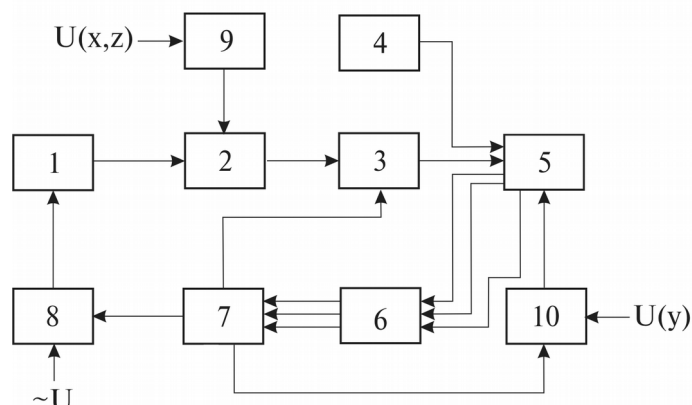


Рисунок 11. Структурная схема системы автоматического управления

Разработана структурная схема ЛТК, информативным параметром в которой является акустический сигнал из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом.

Разработана микропроцессорная система, осуществляющая процесс обработки цифровой информации и управления, включающая в себя центральный процессорный элемент, генератор тактовых импульсов, постоянное и оперативное запоминающие устройства, аналогово-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи. Программное обеспечение микропроцессорной системы на основе показаний пьезодатчика обеспечивает управление технологическим процессом обработки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом диссертационной работы является решение научной задачи, имеющей важное практическое значение и заключающейся в разработке методики и способа управления лазерным технологическим комплексом сварки металлов с использованием параметров технологического процесса, измеряемых в реальном времени, выборе рациональных режимов технологического процесса сварки на основе математической модели зависимостей показателей качества сварного шва от параметров технологического процесса на основе анализа характеристики акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом.

При проведении теоретических и практических исследований по тематике диссертации получены следующие научные и практические результаты для

достижения поставленной цели, которой является повышение эффективности автоматизированной системы управления технологическим процессом сварки металлов:

1. Разработана методика обработки акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом на основе анализа его временных, частотных, энергетических характеристик и оценки влияния параметров технологического комплекса на качество сварки металлов. Акустический сигнал является новым информативным параметром, измеряемым в реальном времени и определяющим качество сварного шва.

2. Исследованы характеристики акустических колебаний из зоны воздействия импульсного лазерного излучения. Выявлено, что частота акустического сигнала слабо зависит от плотности энергии лазерного излучения, а четырехкратное повышение плотности энергии приводит к двукратному увеличению амплитуды снимаемого сигнала. Результаты исследований подтверждаются математическими расчетами и численным моделированием влияния изменения мощности лазерного излучения на характеристики акустических колебаний.

3. Способ сварки разнородных металлов, учитывающий теплофизические свойства металлов и геометрию стыковой плоскости, позволяющий получать требуемое качество сварного шва (получен патент № 2415739, приложение В диссертации).

4. Разработано устройство и метод контроля положения фокуса лазерного излучения относительно стыка свариваемых деталей, позволяющие повысить эффективность обработки за счёт обеспечения смещения фокуса лазерного излучения, не превышающего 10 мкм от расчетной траектории, что составляет не более 2% от ширины сварного шва.

5. Методика оценки глубины сварного шва на основе анализа характеристик акустических колебаний из зоны воздействия лазерного излучения на металл.

6. Структурная и принципиальная схемы системы управления технологическим комплексом, позволяющие в реальном времени обрабатывать и контролировать измеряемые параметры, что обеспечивает требуемые показатели качества сварки.

Полученные в результате проведения исследований результаты по лазерной сварке металлов создают предпосылки для их использования при выполнении автоматизации различных технологических процессов лазерной термообработки, что позволит повысить эффективность производства за счет дополнительного контроля качества деталей в реальном времени.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Основные результаты диссертации изложены в следующих научных работах.

В ведущих научных изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Способ управления процессом лазерной прошивки отверстий в сталях на основе анализа ультразвуковых колебаний / Шангараев И.Р., Велиев Д.Э., Галанина Н.А., Звездин В.В. // Вестник Чувашского университета. 2013. № 3. — Чебоксары: Изд. «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», 2013г. – с. 302-306.

2. Исследования акустических колебаний при воздействии импульсного лазерного излучения / Шангараев И.Р., Велиев Д.Э., Галанина Н.А., Звездин В.В., Саубанов Р.Р. // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. — Чебоксары: Изд.

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», 2014г. – С. 131-135.

Авторские свидетельства, дипломы, патенты, лицензии, информационные карты, алгоритмы, проекты:

3. Пат. 2415739, Россия, МПК В23К26/40 В23К9/23 В23К33/00. Способ лазерной сварки деталей из разнородных металлов / Звездин В.В., Ибрафилов И.Х., Велиев Д.Э. — 2009122958/02; Заявлено 16.06.2009; Оpubл. 27.12.2010.

В других изданиях:

4. Стабилизация энергетических параметров в зоне взаимодействия лазерного излучения с металлом на основе измерения скорости вылета частиц / Звездин В.В., Загиров Р.Г., Шангараев И.Р., Велиев Д.Э. // Сборник трудов IX Международного Симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» часть 2, Казань: Изд-во «АтрПечатьСервис», 2008. – С. 364-368.

5. Исследование процесса взаимодействия лазерного излучения с металлами на основе анализа ультразвуковых колебаний / Велиев Д.Э., Ибрафилов И.Х., Звездин В.В., Кузнецов И.Н. // Межвузовский научный сборник «Проектирование и исследование технических систем», вып.№14 – Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА, 2009 – С. 51-55.

6. Повышение энергоэффективности автоматической лазерной резки металлов на основе анализа частоты ультразвуковых колебаний из зоны обработки / Ибрафилов И.Х., Звездин В.В., Мавлин Р.Ф., Велиев Д.Э. // Сборник трудов Международной научно-технической и образовательной конференции «ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ», Набережные Челны: Изд-во ИНЭКА, 2010 г. – С. 63-65.

7. Оптимизации мощности лазерного излучения при газолазерной обработке металлов / Ибрафилов И.Х., Звездин В.В., Портнов С.М., Велиев Д.Э. // Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», Донецк: ДонНТУ, 2010. Т. 1 – С. 312-314.

8. Сравнительный анализ экспериментальных данных акустических колебаний при лазерной термообработке материалов / Велиев Д.Э., Звездин В.В., Галанина Н.А. // Сборник трудов VIII международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук». (04 апреля 2013 г.) — Москва: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013 — С. 20-30.

9. Регрессионный анализ экспериментальных данных акустических колебаний при лазерной термообработке металлов / Велиев Д.Э., Ибрафилов И.Х., Звездин В.В., Шангараев И.Р. // Сборник трудов II международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии — перспективные разработки», том 1. North Charleston, SC, USA, 2014. – С. 138-141.

10. Анализ акустических колебаний при лазерной термообработке / Велиев Д.Э., Ибрафилов И.Х., Звездин В.В. // BEAM TECHNOLOGIES & LASER APPLICATION, Proceedings of the International scientific and technical Conference. Санкт-Петербург, 2016. С. 256-261.

11. Исследование спектрального состава акустического сигнала при импульсном воздействии лазерного излучения на металл / Велиев Д.Э. // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация, выпуск № 2 (69) – Набережные Челны, 2016. – С. 63-69.