

ХАРАХАШЕВ АНДРЕЙ ХАЧЕХПАРОВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ
СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ ТОЛЩИНОЙ 1-12 ММ**

**Специальность: 05.03.06 – Технологии и машины сварочного
производства**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им Н.Э. Баумана.

Научный руководитель — д.т.н., профессор А.Г. Григорьянц

Официальные оппоненты — д.т.н., профессор В.М. Ямпольский
к.т.н. М.Е. Щеглов

РАН

_____ 2001 г. на заседании
1.01. в Московском государственном
Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я

1572667
Харахашев А.Х.
Численное моделирова
ние процесса лазерно
2001 0.00

7-0963.

им экземпляре, заверенный печатью,

миться в библиотеке

_____ 2001 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1572667

Харахашев А.Х. Численное

А.В. Коновалов

А.В. Коновалов

001 г.

Заказ № 83

Типография МГТУ

Актуальность проблемы. Технологический процесс лазерной сварки с глубоким проплавлением характеризуется большими значениями коэффициента формы шва, малой зоной термического влияния, низким уровнем остаточных деформаций и высокой производительностью труда. Несмотря на накопленный большой практический опыт, разработка технологии лазерной сварки продолжает оставаться трудоемким и дорогостоящим процессом, требующим высокой квалификации для достижения наилучших сварочных результатов. Один из наиболее прогрессивных способов подбора режимов – построение математических моделей процесса.

Интегральные модели, широко используемые технологами до недавнего времени, применимы только для описания однородных процессов или процессов в узком диапазоне режимов и материалов. Описание в рамках таких моделей лазерной сварки с глубоким проплавлением, без учета неоднородных, нелинейных и взаимосвязанных физических процессов, протекающих в зоне обработки, будет неадекватно.

Известно, что в ходе лазерной сварки с глубоким проплавлением в зоне обработки формируется парогазовый канал, который обеспечивает проникновение вглубь материала лазерного луча, как концентрированного, объемного источника тепла. Канал весьма неустойчив. Испарение на стенках увеличивает газодинамическую плотность его среды, усиливаются ионизационные процессы, растет ее оптическая плотность. Пароплазменная, сильноионизированная среда канала экранирует лазерное излучение (ЛИ). В результате испарение прекращается, среда разрезается и просветляется. Это повторяется периодически и, в конечном итоге, определяет флуктуации доли энергии, проникающей в зону обработки и, соответственно, технологическую эффективность всего процесса. Поскольку совместное аналитическое решение уравнений, описывающих эти процессы, невозможно, моделирование поведения канала при лазерной сварке проводится численными методами.

Известно, что уровень адекватности полученных при исследовании результатов зависит от корректности выбора модели состояния рассматриваемой среды, представляющей собой совокупность соответствующих уравнений статистики и условий, определяющих характеристики рассматриваемой системы как статистического ансамбля частиц. Поэтому при по-

строении модели поведения канала необходим подбор соответствующей модели состояния его среды.

Цель работы. Разработка программного продукта на основе численной модели процессов в парогазовом канале для снижения затрат на определение параметров режима лазерной сварки стыковых соединений сталей без присадочного материала.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели были использованы теоретические и вычислительные методы исследования. Процессы тепло- массопереноса, энергообмена, рефракции ЛИ в среде канала исследовались исходя из положений теории волновых процессов, термодинамики и статистической физики, механики сплошной среды, молекулярно-кинетической теории, физики плазмы. Массоперенос в жидкой фазе исследовался методом покапельного адиабатического переноса. Процессы теплопереноса в жидкой фазе исследовались исходя из положений термодинамики, в твердой фазе - путем решения уравнений теплопроводности в линейной постановке. Приведенные к расчетному виду уравнения модели решались в численном виде методом "распада разрывов". Разработанная модель была реализована в многомодульной программе, составленной на языке Turbo PASCAL- 7.0. Расчеты проводились на ЭВМ "Pentium"-II. Результаты вычислительных экспериментов сопоставлялись с результатами известных натурных экспериментов по сварке стали 12X18H10T методами математической статистики.

Научная новизна связана с раскрытием особенностей кинетики физических процессов, определяющей энергозатраты в зону обработки и глубину проплавления в ходе вычислительных экспериментов на численной модели парогазового канала лазерной сварки.

При моделировании сварки хромоникелевых сталей CO₂-лазерами непрерывного режима генерации установлено, что:

- в объеме парогазового канала имеют место периодические флуктуации оптической плотности среды, как следствие флуктуаций ее термодинамических параметров (плотности заряженных частиц, давления, температуры);
- частота флуктуаций определяется соотношением параметров режима: мощностью ЛИ, скоростью сварки, заглублением фокуса луча под поверхность материала ($\sim 1 \div 10$ кГц, при $P = 3,5 \div 10$ кВт, $v_{св} = 0,6 \div 3$ м/мин);
- флуктуации оптической плотности среды вызывают периодическое из-

менение распределения тепловой энергии на различных участках стенок канала, что является одной из причин неравномерности глубины проплавления при лазерной сварке.

Практическая ценность. Разработана инженерная методика расчета глубины проплавления при лазерной сварке в движении хромоникелевых сталей больших толщин на основе численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в парогазовом канале. Использование данной методики повышает качество разработки и снижает себестоимость конкретной операции сварки и всего изделия в целом. Методика применима для прогнозирования глубины проплавления в ходе сварки с подачей технологических газов и осциллированием фокуса лазерного луча, а также для прогнозирования технологических результатов некоторых видов лазерной обработки глубоких закрытых отверстий. Методика позволяет прогнозировать результаты технологических процессов, недостижимых в настоящее время для натурных экспериментов по техническим или экономическим причинам.

Апробация работы. Основные положения работы и результаты исследований докладывались на VII Международной конференции "Лазеры в науке, технике и медицине", Сергиев Посад, 22-26 сентября 1996 г., VI Международной конференции ILLA'98 "Лазерные технологии'98", Шатура, 25-28 июня 1998 г., II Всероссийской научно-технической конференции "Компьютерные технологии в соединении материалов", Тула, 6-8 октября 1998 г., X Всероссийской научно-технической конференции "Теплофизика технологических процессов", Рыбинск, 16-19 мая 2000 г. и научных семинарах кафедры "Лазерные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995-2000 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Выполнена на 129 машинописных листах содержит 39 рисунков, 12 таблиц, 144 наименования (в том числе 49 иностранных) источников используемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору современного состояния некоторых аспектов взаимодействия ЛИ с материалом при лазерной обработке, в том числе лазерной сварке, и анализу некоторых характерных моделей этого

технологического процесса.

Анализ литературы позволил при построении математической модели взаимодействия ЛИ с материалом ограничиться рассмотрением процессов: отражения и поглощения ЛИ в приповерхностном слое ($10^{-6} \div 10^{-7}$ м; модель Друде), испарения с поверхности, плавления материала и продвижения фронта плавления, теплопроводностного переноса энергии вглубь металла. Для моделирования процесса сварки в движении рассмотрены физические условия устойчивости (сохранение формы) парогазового канала и гидродинамические осцилляции в сварочной ванне: образование на передней стенке канала ступеньки расплава и периодический перенос расплава в хвостовую часть ванны, "капиллярные осцилляции" на стенках канала, дискретное его перекрывание объемом расплава.

Известно, что состояние канала определяется процессом взаимодействия ЛИ с его средой. В проведенном обзоре рассмотрены условия и механизмы развития оптического пробоя в парах металла, который приводит к росту оптической плотности среды, что сказывается на общей энергетической эффективности процесса сварки.

Основные аспекты процесса описаны в литературе. В работах А.Г. Григорьянца, В.А. Лопоты и Е. Байера экспериментально исследована динамика истечения среды из канала, в работах К. Бехлера, В. Гатзвейлера и Д. Майшнера отмечено переизлучение среды. Влияние газов, подаваемых в зону обработки, отмечено В.А. Фроммом, У. Аратой и Е. Байером. О дефокусирующих луч свойств среды канала говорится в работах А. Матсунавы, Ю.П. Райзера и А.Ю. Силантьева, о фокусирующих - в работах Г.А. Аскарьяна, Ф.В. Бункина и В.А. Баташова. Однако представленные результаты исследований носят частный характер, не охватывают весь процесс взаимодействия ЛИ со средой в целом ввиду многосторонности и взаимосвязанности его составляющих.

Комплексное рассмотрение данного процесса возможно при математическом моделировании лазерной сварки. В работах Т. Охджи, Р.Е. Уоррена и Дж. Мазумдера моделируются тепловые процессы и формирование канала для одномерного случая неподвижного источника. Многомерный процесс сварки в движении, при учете образования канала промоделирован в работах М. Каутелло, Д. Крукиани и А.Н. Трофимова. Процессы тепло-массопереноса в жидкой фазе в движении рассмотрены С.Г. Ламбракосом и Е.А. Метзбауером. Газодинамические процессы в среде одномерного ка-

нала при неподвижном источнике рассмотрены в работах В.В. Марущенко и Р.В. Арутюняна.

Однако в этих моделях взаимодействие ЛИ со средой канала либо не рассматривалось вообще, либо среда полагалась однородной, хотя она неоднородна по времени и объему и весьма существенно влияет на энергетическую эффективность сварки. О.Б. Бибиком и А.Н. Трофимовым проведено моделирование модуляций плотности среды канала по времени, но не учитывалась неоднородность ее по объему, рассматривалась одномерная задача для неподвижного источника без учета процессов плавления на стенках.

На основании проведенного анализа были сформулированы следующие задачи, позволяющие достигнуть поставленной цели исследования:

1. построение физической модели процессов, протекающих в парогазовом канале при лазерной сварке с глубоким проплавлением:

-тепло- массопереноса;

-транспортировки излучения;

-взаимной диффузии компонент среды и технологического газа, подаваемого в зону обработки;

-взаимодействия ЛИ и среды канала с его стенками;

2. построение многомерной математической модели поведения канала;

3. проверка соответствия результатов моделирования и реального процесса.

Вторая глава посвящена выбору модели состояния среды канала. Выполнена сравнительная оценка моделей, традиционно применяемых при описании реализуемых плазменных состояний: моделей локального термодинамического равновесия (ЛТР), частичного термодинамического равновесия, корональной и столкновительно-излучательной моделей для характерных условий канала $p = 1$ атм, $T = 10^4$ К, плотности электронной n_e и нейтральной n_a компонент среды $\approx 10^{17}$ см⁻³ и 10^{18} см⁻³ соответственно. На основании критерия Грима сделан вывод о высокой частоте столкновительных процессов. В этом случае непригодна корональная модель, используемая для $n_e \leq 10^{11}$ см⁻³, а столкновительно-излучательная и модель частичного термодинамического равновесия сводятся к модели ЛТР. Модель ЛТР предполагает выполнение условий термодинамического равновесия (квазинейтральность, больцмановское и максвелловское распределение частиц, ионизационно-рекомбинационное равновесие) для малых объемов среды, характеризующихся локальными значениями термодинамических параметров,

что не исключает наличия неоднородностей и протекания процессов обмена в ее рассматриваемом макрообъеме.

Третья глава посвящена рассмотрению физических процессов, протекающих в канале при взаимодействии ЛИ и струи технологического газа с его средой. Построена физическая модель, описывающая прохождение ЛИ через оптически плотную среду в рамках классической волновой оптики. Рефракция ЛИ в модели определялась как фазовый набег, эквивалентный перекосу плоского волнового фронта при прохождении им участков среды с различной оптической плотностью, где различна фазовая скорость световой волны.

Фазовые скорости точек канала, как функции относительной диэлектрической проницаемости ($v_\phi = c/\varepsilon^{1/2}$) рассчитывались в зависимости от локальных термодинамических параметров при рассмотрении среды канала как неионизированной, неполярной диэлектрической среды, характеризуемой коэффициентом поляризуемости α , давлением p и температурой T :

$$\varepsilon_n = \frac{3kT\varepsilon_0 + 2p\alpha}{3kT\varepsilon_0 - p\alpha}, \quad (1)$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума; k - постоянная Больцмана,

или ионизированной среды (для излучения CO_2 -лазера, $\lambda = 10,6$ мкм):

$$\varepsilon_i = 1 - 10^{-25} n_e. \quad (2)$$

Парциальное влияние вышеупомянутых механизмов ($v_{\phi m} = v_{\phi m}(T, p, n_e)$, где $m = n, i$) на рефракцию ЛИ при условии их аддитивности оценивалось следующим образом: $\varepsilon_p = \varepsilon_n + \varepsilon_i - 1$.

В результате, задача сводилась к нахождению значений термодинамических параметров каждой точки канала (p , T и n_e), определяемых, в свою очередь, процессами переноса: тепло- массопереносом и транспортировкой излучения в его среде, взаимной диффузией технологического газа и среды.

Процессы тепло- массопереноса в теплопроводной, квазинейтральной газоподобной среде описывались системой классических уравнений газовой динамики.

Поглощение в среде описывалось уравнением Бугера-Ламберта ($L = L(\chi)$). Скорректированный на вынужденное испускание, уточненный

фактором Гаунта коэффициент поглощения ЛИ ($\lambda = 10,6$ мкм) оценивался как:

$$\chi = \frac{2,82 \cdot 10^{-39} n_e^2}{T^{3/2}} \lg \frac{2,17 \cdot 10^5 T}{n_e^{1/3}}. \quad (3)$$

n_e рассчитывалась по уравнению Саха в силу локальной равновесности среды.

Энергетические потери объема среды на тепловое излучение оценивались при рассмотрении в континууме и линиях:

$$\Psi = 4,1 \cdot 10^{-40} T^{1/2} n_e^2 (1 + x_g), \quad (4)$$

где $x_g = E_g/kT$, E_g - энергия связи нижнего возбужденного состояния атома.

Входящий в уравнение энергии термодинамический коэффициент теплопроводности λ_T оценивался исходя из соображений классической газокINETической теории, при рассмотрении среды как химически многокомпонентной системы (т.е. с учетом сварки реальных сталей) нейтральных, сталкивающихся между собой частиц и при учете электростатического взаимодействия ионизированных частиц (амбиполярной диффузии, реактивного и электронного механизма теплопроводности). Результирующий λ_T рассчитывался при учете долевого вклада взаимодействий неионизированных и ионизированных частиц среды в зависимости от степени ее ионизации.

Влияние технологических газов на энергетическую эффективность лазерной сварки обусловлено изменением степени ионизации результирующей смеси при взаимной диффузии компонент среды и энергетически "холодных" газов. Изменение парциальных плотностей компонент ρ_k за счет диффузионных потоков образующейся смеси определяло изменение результирующей степени ее ионизации в каждом элементарном объеме среды.

В четвертой главе предложенная в предыдущей главе физическая модель процессов, протекающих в среде канала, была сведена к единой расчетной системе уравнений, которая решалась в численном виде путем разбиения моделируемой области "сеткой" на ячейки, где выполнялись условия ЛТР.

Ввиду очевидной неосесимметричности процесса при моделировании сварки в движении задача рассматривалась в декартовой системе координат. Полагая, что основные процессы взаимодействия ЛИ с материалом на передней стенке канала, кристаллизационные процессы и перенос жидкого

металла могут быть описаны в вертикальной и продольной координатах, моделирование было сведено к рассмотрению одного центрального, вертикального, однородного по поперечной координате слоя канала. Его конфигурация практически полностью определяет глубину проплавления и форму продольного сечения сварочной ванны. Переход к плоской двумерной задаче дал возможность резко сократить объем вычислений.

Основные уравнения модели, записанные в проекциях на оси координат, и расчетные зависимости представлены в системах (5) и (6) соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(p + \rho v^2)}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial((\varepsilon_s + p)u)}{\partial x} + \frac{\partial((\varepsilon_s + p)v)}{\partial y} &= L - \Psi + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda_T}{c_v} \frac{\partial e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda_T}{c_v} \frac{\partial e}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v)}{\partial y} &= 0; \\ \varepsilon_s &= \rho \left(e + \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \right); \\ e &= \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}; \\ T &= \frac{p}{\rho R}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где ρ - плотность среды;

u и v - вертикальная и горизонтальная составляющие вектора скорости движения среды соответственно;

L - диссипация энергии ЛИ в среде;

c_v , γ и R - удельная теплоемкость, показатель адиабаты и газовая постоянная среды соответственно,

и

$$\left. \begin{aligned} L &= L(\chi); \\ \Psi &= \Psi(T, n_e); \\ \chi &= \chi(T, n_e); \\ n_e &= n_e(T, \rho); \\ \lambda_T &= \lambda_T(T, r_k, \rho, n_e); \\ \varepsilon &= \varepsilon(T, p, n_e), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где r_k - радиусы упруго взаимодействующих частиц.

Прохождение ЛИ через канал было представлено как взаимодействие совокупности отдельных лучей – носителей доли энергии, составляющих лазерный пучок, со слоями ячеек среды, что позволило оценить диссипацию энергии ЛИ в отдельных ячейках и проследить его рефракцию в канале.

Граничные условия (взаимодействие среды со стенками канала) определяли: передачу энергии стенкам от среды, поступление испаренного металла и движение фронтов испарения и плавления в материале.

Фазовый переход расплав - среда рассматривался в рамках модели "изотермического скачка". Полагалось, что все процессы на стенках канала определяются суммарным энергетическим воздействием поглощенной доли нормальной составляющей ЛИ и кондуктивной теплопередачей от перегретой среды. Доля энергии на испарение (масса пара) определялась по линейно аппроксимированной эмпирической зависимости от плотности мощности ЛИ. На границе среда - расплав вводилось условие фазового равновесия и условие Жуге, определяющее начальную скорость истекающих паров.

Помимо испарения, в модели учитывалась диссипация поглощенной стенками канала энергии на образование слоя расплава и нагрев холодного образца до температуры плавления. С учетом этого определялись скорости образования пара и расплава и, соответственно, локальные смещения фронтов испарения и плавления, определяющих конфигурацию канала и глубину проплавления образца при лазерной сварке, что являлось технологическим выходом модели.

При сварке в движении учитывался перенос образующейся под наезжающим со скоростью сварки лазерным лучом и достигшей критического размера капли расплава с фронтальной стенки канала на заднюю. Перенос рассматривался как мгновенный акт, сопровождающийся адиабатическим теплопереносом. Другие физические процессы в жидкой фазе сварочной ванны в модели не рассматривались.

Система уравнений решалась методом "распада разрывов", что позволяло получать численные решения задачи с приемлемой (4%), для практических целей точностью, в том числе и для случая разрывных течений (область ударных волн) в среде канала, характеризуемой высокими "плазменными" температурами, когда другие "сеточные" методы дают существенную ошибку при моделировании.

Вычислительные эксперименты проводились для лазерной сварки стали 12X18H10T толщиной 1-12 мм. В качестве газа, заполняющего канал при отсутствии паров стали и составляющего атмосферу над его поверхностью, выбирался He.

В пятой главе представлены результаты вычислительных экспериментов и проведено их обсуждение.

Построение самой модели, основанной на детальном рассмотрении процессов переноса в канале и на его стенках, позволило в ходе моделирования, помимо получения технологических результатов (глубина проплавления, форма канала), проанализировать течение отдельных физических процессов в канале, их вклад в результирующее изменение параметров среды и энергобаланс всего процесса сварки в целом, что сделало рассматриваемый технологический процесс более прогнозируемым и подконтрольным. Так, была установлена общая последовательность протекающих в канале физических процессов: 1) испарение со стенок и расширение облака пара в направлении выхода из канала в течение $\sim 10^{-5}$ с; 2) нарастание в области фокуса лазерного луча ионизационных процессов в парах ($\sim 10^{-7}$ с) и их распространение в донную часть канала ($\sim 2 \cdot 10^{-6}$ с); 3) формирование устремляющегося к поверхности канала потока сильноионизированной среды, высокое поглощение ($\chi \approx 1 \div 11 \text{ см}^{-1}$) и экранирование ЛИ в канале, прекращение испарения, вынос массы среды из канала ($\sim 10^{-4}$ с); 4) разрежение среды, формирование малоинтенсивной петли пристеночной циркуляции слабоионизованного газа, обеспечивающей поступление в канал холодного газа окружающей среды, оптическое просветление среды для ЛИ и возобновление испарения в канале ($\sim 0,1 \cdot 10^{-3} \div 0,9 \cdot 10^{-3}$ с).

Полученные в ходе моделирования расчетные временные зависимости интенсивности истечения потоков среды из канала, как следствие протекания в нем упомянутой последовательности процессов, хорошо согласовывались с результатами наблюдений известных натурных экспериментов по лазерной сварке (рис. 1). Кривые отражали общие закономерности, одна-

ко отмечены различия, которые могут быть объяснены следующим: 1) отсутствием учета конвективных гидродинамических осцилляций в жидкой фазе сварочной ванны; 2) некоторой нестабильностью энергии излучения реальных многомодовых технологических лазеров; 3) химической неоднородностью реальной стали; 4) возмущениями, возникающими под действием высвобождаемых в ходе сварки механических напряжений в стали.

Установлена зависимость динамики физических процессов в канале от соотношения основных технологических параметров процесса сварки (рис. 2). Увеличение мощности ЛИ P приводит к ускорению развития ионизационных процессов в канале, существенному уменьшению периода оптического просветления среды ($P=10$ кВт, $v_{св}=0,65$ м/мин, $df=1,5$ мм, период просветления равен 0,08 мс), практически полному оптическому блокированию его нижней части сильноионизированной средой и лишь частичному периодическому разрежению ее в объеме канала. Увеличение скорости сварки $v_{св}$ напротив ведет к возрастанию периода просветления среды ($P=3,5$ кВт, $v_{св}=2,5$ м/мин, $df=1,5$ мм, период просветления равен 0,9 мс) и полному разрежению среды канала. Смещение фокуса вверх по лучу равносильно возрастанию $v_{св}$, а смещение вниз – увеличению P . Таким образом, было установлено, что модель копирует реакцию процесса сварки на любые изменения входных технологических параметров.

Установлено, что развитие канала в глубину через некоторое время прекращается, и программа моделирует фазу квазистационарного состояния канала с флуктуациями глубины проплавления – пиками проплавления, являющимися закономерным отражением состояния среды канала. Максимумы глубины проплавления соответствуют периоду просветления среды, углубления канала за счет испарения со стенок, продвижения фронта плавления в глубь массива образца, минимумы – периоду экранировки ЛИ сильноионизированной средой и прекращения испарения.

Результаты расчетов глубины проплавления, проведенных для различных режимов сварки стали 12Х18Н10Т, сравнивались с данными натуральных экспериментов (рис. 3). Сравнение показало хорошие прогностические свойства модели. Расхождение значений глубины составило $\sim 4,75 \pm 10,5\%$, что может быть объяснено: упрощенным рассмотрением в модели физических процессов в жидкой фазе сварочной ванны и процесса распространения тепла в массиве образца, химической неоднородностью реальной стали, и не снижает практической эффективности модели, делая ее во многих слу-

чаях пригодной для подготовки технологического процесса лазерной сварки в условиях производства.

Детальное рассмотрение взаимодействия ЛИ со средой канала и его стенками позволило наметить пути применения представленной модели для прогнозирования глубины проплавления при сварке с применением некоторых технологических приемов, повышающих эффективность проплавления (подача в зону обработки различных газов, осциллирование фокуса луча и т.д.), и для прогнозирования результатов некоторых других, помимо сварки, видов лазерной обработки глубоких закрытых отверстий.

Приложение содержит данные в виде констант моделирования, необходимых для настройки расчетной программы: теплофизические параметры стали 12Х18Н10Т и технологического газа (He), начальные параметры моделирования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Использование традиционных методов определения параметров режима лазерной сварки с глубоким проплавлением на основе моделей интегрального типа требует проведения контрольных экспериментов из-за сложности учета физических процессов в парогазовом канале, их нелинейности и взаимосвязанности. Перспективной является разработка дифференциальных моделей, учитывающих взаимодействие лазерного излучения (ЛИ) со средой и стенками канала.
2. Сравнительный анализ моделей, традиционно применяемых для описания плазменных состояний (модели локального термодинамического равновесия (ЛТР) и частичного термодинамического равновесия, корональной и столкновительно-излучательной моделей) с позиций их адекватности описания состояния среды парогазового канала с характерными параметрами $p = 1$ атм, $T = 10^4$ К, $n_e \approx 10^{17}$ см⁻³ показал, что ввиду преобладания ударных процессов над радиационными при энергообмене между частицами среды наиболее приемлемой является модель ЛТР.
3. Разработана модель, основанная на решении двумерной системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы, протекающие при взаимодействии среды парогазового канала с ЛИ и технологическим газом: поглощение, переизлучение и рефракцию ЛИ, тепло- массоперенос, взаимную диффузию газа и среды канала.

4. Диффузия технологического газа и среды канала влияет на оптическую прозрачность последней, определяя изменение ее степени ионизации, связанной с различием потенциалов ионизации газа и среды. Изменения концентрации различных компонент определяют коэффициент теплопроводности среды.
5. Для нейтральных компонент среды коэффициент теплопроводности был оценен, исходя из положений газокINETической теории. Для ионизированных компонент среды теплоперенос увеличивается вдвое за счет совместной диффузии электростатически связанных разноименно заряженных частиц, имеющих разные подвижности. Реактивная и электронная теплопроводность увеличивают теплоперенос в среде независимо от других механизмов.
6. Представление горизонтального адиабатического переноса материала с передней стенки канала на заднюю в виде капли расплава, образующейся под действием нормальной составляющей ЛИ и достигшей критического размера, при учете ее частичного испарения, позволяет получать форму канала, близкую к реальной при моделировании его движения по ходу луча.
7. Анализ численных методов решения систем дифференциальных уравнений тепло- массопереноса в пароплазменной среде канала показывает, что только метод "распада разрывов" позволяет получать приемлемое по точности решение для случая разрывных течений (область ударных волн), имеющих место в канале лазерной сварки, когда другие "сеточные" методы дают существенную ошибку, устранение которой требует более мелкой расчетной сетки, значительно увеличивающей время счета.
8. В объеме канала имеют место флуктуации оптической плотности среды, определяющие энерговклад в зону обработки, процессы испарения и плавления на стенках канала и глубину проплавления при лазерной сварке. Частота флуктуаций определяется соотношением параметров режима: мощностью ЛИ, скоростью сварки, заглублением фокуса луча под поверхность материала ($\sim 1 \div 10$ кГц, при $P = 3,5 \div 10$ кВт, $v_{св} = 0,6 \div 3$ м/мин).
9. Сравнение результатов расчетов глубины проплавления, проведенных для различных режимов сварки стали 12X18H10T, и данных натурных экспериментов показало хорошие прогностические свойства модели. Расхождение значений глубины проплавления составило $\sim 4,75 \div 10,5\%$, что не снижает практической эффективности модели, делая ее во многих случаях пригодной для подготовки технологического процесса лазерной сварки в усло-

виях производства.

10. Предложенная методика принята для практического использования в ИГЛИТ РАН.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Майоров Л.Н., Харахашев А.Х. Моделирование процессов прохождения излучения через парогазовый канал для расчета параметров лазерной сварки с глубоким проплавлением // Сварочное производство. - 1996.- N8. - С.27-30.

2. Майоров Л.Н., Харахашев А.Х. Моделирование процесса лазерной сварки с глубоким проплавлением // Лазеры в науке, технике и медицине: Тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. - Сергиев Посад, 1996. – С.57-58.

3. Майоров Л.Н., Харахашев А.Х., Таксанц М.В. Численное моделирование лазерной сварки с глубоким проплавлением // Лазерные технологии '98: Тез. докл. VI Междунар. конф. ILLA'98. - Шатура, 1998. – С.114.

4. Майоров Л.Н., Харахашев А.Х., Таксанц М.В. Численное моделирование взаимодействия луча со средой канала при лазерной сварке // Компьютерные технологии в соединении материалов: Тез. докл. II Всеросс. науч.-техн. конф. - Тула, 1998. – С.11-12.

5. Харахашев А.Х. Численное моделирование процесса взаимодействия луча со средой парогазового канала при лазерной сварке с глубоким проплавлением // Теплофизика технологических процессов. Тез. докл. X Всеросс. науч.-техн. конф. - Рыбинск, 2000. – С.33-34.

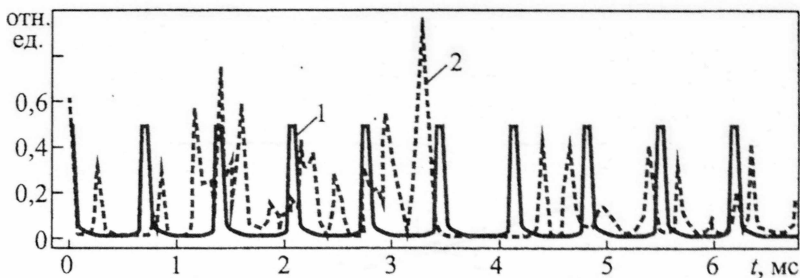
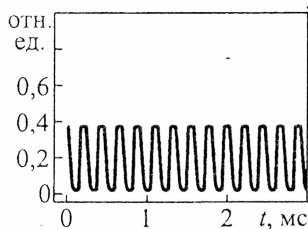
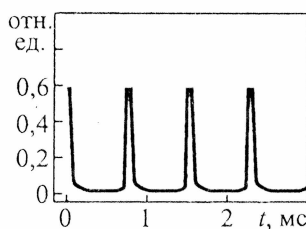


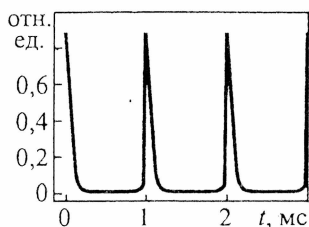
Рис. 1. Флуктуации интенсивности истечения из канала потоков среды ($P=10$ кВт, $v_{св}=1,5$ м/мин, $df=1,5$ мм): 1- результаты численного моделирования; 2- результаты, полученные группой В. Гатцвейлера экспериментально с использованием фотодиодов



а)

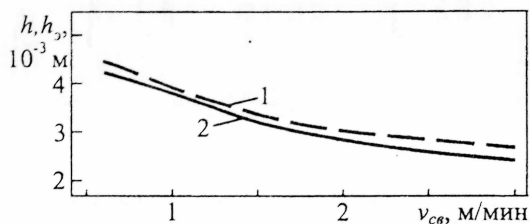


б)

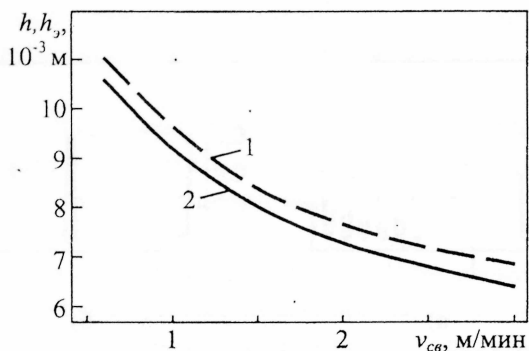


в)

Рис. 2. Полученные в ходе вычислительных экспериментов флуктуации интенсивности истечения из канала потоков среды при лазерной сварке с различными параметрами режимов ($df=1,5$ мм): а) $P=10$ кВт, $v_{св}=0,65$ м/мин; б) $P=3,5$ кВт, $v_{св}=0,65$ м/мин; в) $P=3,5$ кВт, $v_{св}=2,5$ м/мин



а)



б)

Рис. 3. Зависимости глубины проплавления, достигнутой в ходе вычислительного h (кривая 1) и натурального h_g (кривая 2) экспериментов, от скорости сварки $v_{св}$ при лазерной сварке стали 12Х18Н10Т ($df=1,5$ мм): а) $P=3,5$ кВт; б) $P=10$ кВт