Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»

На правах рукописи

A

НИКИФОРОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ТРЕХМЕРНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ МНОГОФАЗНАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЙ В ВАННЕ РАСПЛАВА ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Гильмутдинов Альберт Харисович

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	12
1.1 Существующие модели источников лазерного излучения	14
1.2 Описание гидродинамики ванны расплава сталей и сплавов	19
1.3 Способы ультразвукового воздействия на ванну расплава	26
1.4 Методы моделирования многофазных сред	30
1.4.1 Meтoд Volume of Fluid	32
1.4.2 Метод Mixture	33
1.4.3 Модель Эйлера	34
Вывод по главе 1	34
Глава 2. МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА	
ВЕЩЕСТВО	36
2.1 Постановка задачи	36
2.2 Управляющие уравнения и условия однозначности	37
2.2.1 Описание тепловой задачи и воздействия лазера на вещество	37
2.2.2 Уравнения гидродинамики с учетом термокапиллярной конвекции	40
2.3 Описание численной модели	41
2.3.1 Пространственная и временная дискретизация модели	41
2.3.2 Описание физических свойств исследуемого материала	42
2.4 Результаты численного решения	44
2.5 Верификация численного решения	46
Вывод по главе 2	49
Глава 3. СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ И ГИДРОДИНАМИКИ	
РАСПЛАВА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	50
3.1 Постановка задачи	50
3.2 Математическое описание термопрочностной и гидродинамической	
задач	50
3.3 Механизм взаимодействия термомеханического и гидродинамического	
решателей	53
3.4 Описание численной модели	53
3.5 Результаты расчетов и анализ результатов	55
Выводы по главе 3	59

Глава 4. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ	
ТЕЧЕНИЙ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ	60
4.1 Решение двумерной задачи точечной лазерной сварки	60
4.1.1 Постановка задачи	60
4.1.2 Управляющие уравнения	61
4.1.3 Граничные условия	63
4.1.4 Описание модели	64
4.1.5 Результаты моделирования и сравнение с экспериментом	66
4.2 Трехмерная многофазная модель лазерной сварки в ультразвуковом	
поле	73
4.2.1 Постановка задачи	73
4.2.2 Математическое описание тепломассопереноса многофазной	
жидкости	74
4.2.3 Использование пользовательских функций в Ansys Fluent	80
4.2.4 Описание численной модели	81
4.2.5 Результаты расчетов и верификация	82
4.3 Трехмерная многофазная модель лазерной наплавки в ультразвуковом	
поле	87
4.3.1 Постановка задачи	87
4.3.2 Управляющие уравнения	87
4.3.3 Описание численной модели	87
4.3.4 Результаты моделирования	89
Выводы по главе 4	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ	108
Приложение 1. Основные переменные и вспомогательные функции	109
Приложение 2. Исполняемый файл	111
Приложение 3. Акт об использовании в учебном процессе результатов	
диссертационного исследования	117
Приложение 4. Акт апробации результатов	118

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АН РТ – Академия наук Республики Татарстан

УЗ – ультразвук

УЗК – ультразвуковые колебания

- CFD Computational fluid dynamics (вычислительная гидродинамика)
- DEM Discrete element method (метод дискретных элементов)

DPM – Discrete phase model (модель дискретной фазы)

EEM – Eulerian-Eulerian model (модель эйлера-эйлера)

EGM – Eulerian granular model (эйлерово-гранулярная модель)

EMO – Eulerian multiphase model (Эйлеровы многофазные течения)

- FEM Finite element method (метод конечных элементов)
- GMA Gas metal arc welding (дуговая сварка в защитных газах)
- LPBF Laser powder bed fusion (лазерное сплавление порошкового слоя)
- LMP Lagrangian multiphase model (лагранжева многофазная система)
- MMA Metal Manual Arc (ручная дуговая сварка)
- UDM User-defined memory
- $UDF-User\text{-}defined \ function$
- VOF Volume of fluid

введение

Лазерные Актуальность исследования. технологии темы на сегодняшний день один из самых эффективных способов обработки металлов и сплавов. Лазерные резка, сварка, наплавка, гравировка и упрочнение – широко используются во многих отраслях экономики. Экспериментальные исследования последних лет показывают, что эффективность этих процессов может быть существенно повышена за счет дополнительного акустического воздействия на ванну расплава на определенных частотах и амплитудах в процессе обработки материалов. Процессы, сопровождающие перечисленные лазерные технологии, характеризуются чрезвычайной сложностью: высокие градиенты температуры, малые масштабы рассматриваемых областей воздействия лазера, нелинейность физических явлений, обязательный учет многофазности Поэтому сред. распространенным методом их оптимизации является численное моделирование. Современные пакеты прикладных программ для теплового, механического и гидродинамического анализов хорошо показывают себя в типовых проблемах, но функционал не всегда имеют готовый при решении задач, которые подразумевают внедрение новых технологических процессов. В случае и внедрения лазерно-акустических технологий указывается исследования отсутствие значительных результатов.

При этом для многих перечисленных процессов уже существуют устоявшиеся подходы и методы математического моделирования, например, выбор модели источника нагрева для конкретного технологического процесса или отсутствие учета давления насыщенных паров ванне расплава при В низкотемпературной сварки. Ho моделировании прямые эксперименты показывают, что на структуру и форму участков обработки лазером В значительной степени влияет гидродинамика ванны расплава.

При модернизации существующих технологических операций необходимо вновь проводить оценки влияния различных физических процессов, которые влияют на итоговый результат, создавать новые или дополнять существующие

математические модели и проводить верификацию и валидацию для дальнейшего внедрения в производство.

Знакопеременное воздействие на высоких частотах в теории позволяет интенсифицировать течения в застойных областях ванны расплава, уменьшить влияние термокапиллярных течений, влияющих на свободную поверхность жидкого металла, и увеличить количество центров кристаллизации. Однако существующие подходы не позволяют в полной мере описать данную задачу. Следовательно, тема диссертации, связанная с исследованием и моделированием течений в ванне расплава жидкого металла в ультразвуковом поле, является актуальной.

Также актуальность выбранной темы исследования подтверждается Государственных заданий №9.3236.2017/4.6, ee выполнением рамках В №075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020), хоздоговора №96-2022/165 с РФЯЦ-ВНИИЭФ «Создание программных подмодулей «Газодинамика макроуровень», «Частицы: тепломассоперенос макроуровень», «Частицы: тепломассоперенос мезоуровень», «Валик и ванна расплава: тепломассоперенос мезоуровень», «Валик и ванна расплава: тепломассоперенос и прочность макроуровень» в составе программного модуля «Лазерная газопорошковая наплавка» и их интеграция в комплекс программного обеспечения «Виртуальный 3D-принтер», гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00219).

Степень разработанности темы. Исследованиями в области воздействия лазерного излучения на материал и последующего численного моделирования течений в ванне расплава занимается большая группа ученых из разных стран – Г.А. Туричин, В.П. Вейко, М.Д. Кривилев, А.И. Рудской, Д.Н. Трушников, А.А. Попович, И.В. Шишковский, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов, А.М. Гурин, А.А. Карабутов, Р.М. Шагалиев, М.А. Schmidt, Т. Heeling, L. Yang, X. He, C. Lampa, S. Shanmugam, А. Yaghi и др. Однако вопросы степени воздействия ультразвуковых колебаний на ванну расплава и ее конечную форму остаются открытыми.

Таким образом, научная задача, решаемая в диссертации, заключается в разработке математической модели и численной реализации гидродинамики

6

ванны расплава, сформированной лазерным излучением в ультразвуковом поле, и верификация полученного решения с экспериментальными данными. Решение данной задачи имеет научную и практическую ценность для качественного улучшения конечных характеристик сварных соединений при лазерной обработке.

Объект исследования: жидкий металл в ванне расплава, сформированный лазерным воздействием.

Предмет исследования: структуры течений в ванне расплава в ультразвуковом поле.

Цели и задачи диссертационной работы – увеличение однородности поля скоростей в ванне расплава за счет исследования степени влияния ультразвуковых колебаний на течения в процессе лазерной обработки нержавеющих сталей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать многофазную нелинейную трехмерную нестационарную математическую модель лазерной сварки и лазерной наплавки с учетом конвективных и радиационных тепловых потерь, а также возникновения термокапиллярных течений.

2. Программно реализовать численные модели двумерной и трехмерной многофазных задач лазерной сварки и наплавки с учетом внешних ультразвуковых колебаний в гидродинамических уравнениях.

3. Установить влияние разных частот ультразвукового воздействия на структуру течений в ванне расплава в процессе лазерной обработки стали.

4. Произнести валидацию решений разработанных вычислительных алгоритмов с экспериментальными данными.

Научная новизна работы:

1. Разработана нелинейная многофазная математическая модель гидродинамики вязкой жидкости в мезообъеме, *отличающаяся* учетом объемного источника сил знакопеременного внешнего воздействия и моделью теплового источника излучения с супергауссовым распределением с коэффициентами на основе экспериментальных данных.

2. Разработаны функции от температуры для удельной теплоемкости и вязкости вещества, *отличающиеся* аппроксимацией в виде сигмоидального перехода с учетом скрытой теплоты плавления для стабилизации решения при моделировании многофазных течений и ультразвуковых колебаний.

3. Разработан программный код на языке С в виде пользовательской функции для внедрения в конечно-объемный решатель Ansys Fluent, позволяющий учесть внешнее переменное воздействие, объемные источники лазерного излучения и теплоотдачи (конвекция и радиация) при моделировании многофазных сред.

4. Представлена зависимость параметров течения, свободной поверхности и формы ванны расплава в процессе лазерного плавления от частоты ультразвукового воздействия в интервале 20 – 60 кГц.

Теоретическая значимость диссертационного исследования – исследование зависимости дисперсии средней скорости в вязких средах от частоты колебаний в ультразвуковом диапазоне и влияния знакопеременного давления в ванне расплава на конечную форму зоны термического воздействия.

В работе указывается теоретическая возможность управления скоростью потоков в вязкой среде за счет изменения градиента плотности гауссова распределения источника излучения и частоты ультразвукового поля.

Практическая значимость диссертации – создание методики прогнозирования геометрических размеров (глубина, ширина и степень деформации свободной поверхности) ванны расплава и степени гомогенизации структуры материала после технологических процессов на основе лазерного воздействия. Введение ультразвуковых колебаний оптимальной частоты и интенсивности в процессе лазерной термической обработки (лазерная резка, лазерная наплавка) позволяет получить новые, улучшенные, характеристики готового изделия вследствие гомогенизации структуры расплава.

Методология и методы диссертационного исследования. Для решения задач использованы методы математического моделирования, статистического анализа, функционального программирования, экспериментальные работы.

8

Обработка результатов расчетов проводилась с помощью оригинальных программ, написанных на языке Python и MATLAB. Экспериментальные данные использованы для валидации полученных результатов. Постановка задач выполнена с помощью нелинейной теории сплошных тел.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) нестационарная нелинейная математическая модель многофазного тепломассопереноса с учетом сил знакопеременного ультразвукового воздействия;

2) программный код, реализующий предложенные методы и алгоритмы, определяющий межфазный интерфейс с наложением объемных источников тепла, знакопеременного ультразвукового воздействия и минимизирующий паразитные течения, которые формируются вследствие численных ошибок;

3) на основе исследования нестационарной математической модели многофазной гидродинамики в ультразвуковом поле описаны зависимости средних показателей скоростей и геометрических размеров ванны расплава в зависимости от частоты модуляции ультразвука.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается обоснованным выбором физических приближений, математически строгим выполнением расчетов, использованием широко апробированных методов и подходов для описания динамики, а также согласием с экспериментальными данными и данными предыдущих теоретических работ.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– Международная молодежная научная конференция «XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2023);

 Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2023);

– Всероссийская научно-практическая конференция «Яковлевские чтения» (Санкт-Петербург, 2024);

9

– XI Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2024);

– V Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань, 2020; Казань, 2024).

Результаты работы регулярно представлялись и обсуждались на семинарах кафедры «Лазерные и аддитивные технологии» под научным руководством доктора физико-математических наук, академика АН РТ, профессора А.Х. Гильмутдинова и кафедры «Цифровые лазерные технологии» под председательством заведующего кафедрой, доктора технических наук Г.А. Туричина.

Реализация результатов работы: внедрены в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Лазерные акустические технологии», «Математические методы и моделирование в лазерной технике и технологии»; внедрены в ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» и используются в научных исследованиях и разработках института теоретической и математической физики.

Соответствие диссертации паспорту специальности. В диссертации разработана нестационарная нелинейная математическая модель многофазного тепломассопереноса с учетом сил знакопеременного ультразвукового воздействия. Разработан программный код, реализующий предложенные методы и алгоритмы, определяющий межфазный интерфейс с наложением объемных источников тепла, знакопеременного ультразвукового воздействия и устранения паразитных течений, которые формируются вследствие численных ошибок.

Таким образом, результаты диссертационного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

П15. *Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах*: исследовалось влияние знакопеременного давления в ультразвуковом диапазоне на структуру течений в вязкой среде.

П16. *Тепломассоперенос в газах и жидкостях*: для формирований конвекционных течений вследствие сил Марангони в дополнение к уравнениям сохранения импульса и сохранения массы решалось уравнение сохранения энергии через энтальпию, что позволяло учесть влияние лазерного излучения на структуру течений в ванне расплава.

П25. Влияние поверхностных сил на динамику жидкости и газа. Смачивание и растекание: многофазная модель типа воздух-газ реализована в данной работе. Учитываются течения на свободной поверхности при градиенте температур в результате лазерного воздействия на границу раздела фаз.

По теме диссертационного исследования опубликованы 18 работ, в том числе 5 статей в российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (из них 4 статьи в журналах категории К2), 1 статья в журнале, индексируемом в Scopus и категории К1, 8 статей – в других журналах и материалах научных конференций. Получены 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, списка сокращений и условных обозначений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 107 страниц, 46 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 101 наименование.

Сведения о личном вкладе автора. Постановка задач и интерпретация результатов исследования осуществлялась под научным руководством доктора физико-математических наук, профессора, академика АН РТ Гильмутдинова Альберта Харисовича. Личный вклад автора заключается в разработке представленных в диссертационной работе математических моделей гидродинамики и термоупругости, проведении аналитических и численных расчетов, в проведении экспериментальных работ для дальнейшего сравнительного анализа и разработки программ для обработки результатов.

Результаты исследований неоднократно докладывались лично автором на всероссийских и международных конференциях. Все представленные в диссертации результаты получены при непосредственном участии автора.

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Развитие современного мирового и отечественного машиностроения напрямую связано с модернизацией техники и технологией производства изделий. Одним из универсальных и эффективных инструментов для создания и обработки лазерные установки. С деталей машин являются помощью лазерного оборудования осуществляются такие базовые технологические операции, как резка, гравировка, сварка и наплавка. По сравнению с другими процедурами и способами преимущества лазерной техники заключаются в том, что она является основным методом получения сложных контуров во время раскроя листового металла. Готовое изделие не нуждается в дополнительной обработке и обладает высокими показателями качества.

В отличие от стандартных средств создания и обработки деталей (литье, штамповка, фрезерование, сварка дугой и т.д.), которые достаточно полно изучены в технологических циклах, влияние лазерного излучения на вещество все еще остается наукоемким. Это связано с высокими скоростями нагрева и охлаждения металла и малыми размерами ванны расплава, показатели которых трудно фиксировать при проведении экспериментов [1; 2]. Для фундаментального понимания процессов, которые могут критически влиять на микроструктуру и геометрию конечного изделия при лазерной обработке и оптимизации, необходимо создание цифровых моделей.

На сегодняшний день представлено довольное большое число работ, посвященных теме лазерной сварки и наплавки металлов. Проведены экспериментальные исследования при варьировании источников излучения и материалов для обработки. Сформулированы основные математические модели, описывающие тепловые явления в процессе лазерного нагрева и гидродинамику течений в ванне расплава. При этом наблюдается экспоненциальный рост публикаций по данной тематике (рис. 1.1). Это напрямую связано с развитием лазерного оборудования и все большей ее доступности по всему миру.



Количество публикаций с заданными тегами по годам



При увеличении количества исследований, связанных с лазерной обработкой сталей с 2017 года, формируется новое направление – исследование влияния ультразвуковых колебаний в процессе лазерной обработки на конечную структуру и геометрию изделия. Большинство работ на эту тему – экспериментальные и указывают на изменение микроструктуры материала при ультразвуковом воздействии на ванну расплава [3–5]. Показательной является работа [6], в которой исследованы механические свойства и микроструктурные характеристики нержавеющей стали ER321 при наплавке в ультразвуковом (УЗ) поле. Установлено, что зернистая структура нержавеющей стали ER321 сводится к равноосным дендритам (в УЗ) из грубых столбчатых дендритов (без УЗ). УЗ эффективно измельчает размеры зерен, уменьшая их примерно на 150%, и гомогенизирует зернистую структуру слоев осаждения.

На сегодняшний день описано большое количество способов формирования УЗ колебаний в процессе лазерной обработки. Каждая отдельная конфигурация генерации УЗ требует своей математической модели и численного подхода к решению. Тем не менее остается открытым вопрос о контроле зон влияния ультразвука. Один из способов предсказания итоговой формы ванны расплава и зоны определенной структуры является описание течения жидкой фракции в процессе обработки, так как именно скорости потоков и их структура влияют на конфигурацию теплового поля и конечную форму ванны расплава.

1.1 Существующие модели источников лазерного излучения

Для численного моделирования процессов сварки и наплавки в основном используются модели с однородным и неоднородным распределением.

Модель для движущегося источника тепла по закону Фурье впервые была применена Даниэлем Розенталем в 1941 году [7], что является первой моделью источника тепла с однородным распределением. Основным недостатком этого решения было то, что вся энергия процесса концентрировалась в одной точке, что делало практически невозможным определение формы и глубины формирования ванны расплава. Позднее решение было модифицировано, но приемлемое соответствие предсказанному распределению температуры было получено только тепла. Развитием линейное вдали самого источника модели стало OT распределение источника тепла, предложенное Павеличем [8] в 1969 году. С помощью этого решения была сделана попытка определить распределение Основной проблемой двумерного элемента. была температуры внутри невозможность точного представления градиента температуры по толщине модели. Позже Фридман предложил модель источника тепла с распределением по объему. Последовательно были разработаны уравнения, описывающие цилиндрические и квадратные модели источников тепла. Данные модели приближали результаты численных испытаний к реальным экспериментальным данным. Следует отметить, что процессы с высокой плотностью мощности уже описывались с использованием прямоугольных (электронный луч) И цилиндрических моделей источника тепла (лазерный луч). Тем не менее ошибка численного решения не позволяла полностью отобразить природу тепловых процессов при тепловой обработке изделий [9; 10].

В 1983 году была представлена первая модель с неоднородным распределением теплового источника. Предложенная модель в некоторой степени позволяла отображать геометрию сварочной ванны с помощью гауссова распределения тепла на поверхности [11], на основе которой позже была создана дисковая модель. Ее использование все еще было несколько ограничено из-за невозможности определить глубину проплава лазером изделия [9].

Развитие численного анализа процессов лазерной обработки дало толчок к созданию математических моделей источников энергии. Они варьируются от более простых точечных моделей, которые ограничивают всю энергию процесса сварки и наплавки одной точкой (узлом сетки), до линейных и круговых моделей, вплоть до более сложных форм. Однако именно в начале 1980-х годов Джон Голдак предложил широко используемую модель в форме двойного эллипсоида. Хотя в настоящее время она в основном используется для моделирования процессов дуговой сварки, т. е. технологии с формированием жидкометаллической ванной, после соответствующих модификаций ее также можно использовать для моделирования выбранных процессов лазерной наплавки, как показано в статьях [12; 16].

В современных коммерческих пакетах прикладных программ, которые предназначены для анализа процессов лазерной обработки, как правило, используются три основных типа граничного распределения источников энергии:

1) модель источника тепла поверхности Гаусса (нормальное распределение тепла);

2) модель источника тепла двойного эллипсоида (модель Голдака);

3) модель источника тепла конического типа.

Модель распределения Гаусса, в которой энергия распределяется в соответствии с нормальным распределением Гаусса, обычно используется при моделировании процессов обработки с высокой плотностью мощности, т. е. лазерной, плазменной, микроплазменной или электронно-лучевой сварки (рис. 1.2). С помощью распределения источника энергии по Гауссу принято моделировать

методы сварки Keyhole (метод глубокого проплавления). Данный метод характерен глубоким и узким профилем проплавки, вызванным его испарением, с соотношением сторон более 1,5. В среде Visual-Weld (SYSWELD) источник тепла нормального распределения является предопределенным и рекомендуемым моделью, используемой при моделировании процессов поверхностной термообработки, включая закалку лазерным лучом. Модель источника тепла поверхности Гаусса описывается как

$$Q(x,y,z) = Q_0 e^{-\frac{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}{r_e^2}},$$
(1.1)

где Q_0 – плотность мощности лазерного излучения в центре пятна; x_0 , y_0 – координаты центра лазерного пятна; r_e – радиус лазерного пятна.



Рисунок 1.2 – Модель гауссова распределения плотности мощности излучения

Модель Голдака является наиболее популярной моделью источника энергии в коммерческих программах, предназначенных для анализа теплового воздействия на вещество. Модель представляет собой два независимых по фокусам эллипсоида, перпендикулярных друг другу. Данный подход позволяет задавать размер источника энергии в плоскости перпендикулярного направлению сварки из положения источника (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Модель распределения Голдака плотности мощности излучения с геометрическими коэффициентами: *1* и *2* – передняя и задняя части эллипсоида соответственно

В отличие от других объемных моделей, используемых для моделирования дуговой сварки, модель Голдака описывается двумя уравнениями индивидуально для каждой части эллипсоида в отдельности [13; 17; 18]:

• первая

$$Q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abC_f \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{kx^2}{a^2}} e^{-\frac{by^2}{b^2}} e^{-\frac{mz^2}{c^2}}; \qquad (1.2)$$

• вторая

$$Q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abC_r \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{kx^2}{a^2}} e^{-\frac{ly^2}{b^2}} e^{-\frac{mz^2}{c^2}},$$
(1.3)

где Q_f , Q_r – объемная плотность теплового потока в передней и задней частях модели соответственно; Q – полная вложенная мощность; a, b, C_f и C_r – соответственно ширина, глубина и длина передней и задней частей расчетной ванны расплава.

Для моделей источников энергии характерен экспериментальный подбор эффективного коэффициента теплопередачи [17]. Так, для модели Голдака степень передачи энергии на фронтовую и хвостовую части эллипсоидов регулируется с использованием безразмерных коэффициентов f_f и f_r . Эти параметры влияют на распределение потока тепла в материале, что отображает эффект наклона сварочной горелки. Практика показывает, что отношение f_f к f_r обычно принимается как соотношение 60:40. При этом эти параметры должны удовлетворять зависимости $f_f + f_r = 2$ [19]. Коэффициенты k, l и m для стандартной модели Голдака, например при моделировании процессов ручной дуговой сварки (Metal Manual Arc – MMA) принимают значения 3. В случае модификации модели для процессов сварки металлическим электродом в среде защитного газа (Gas Metal Arc Welding – GMA), значения коэффициентов k, l и mтребуется определять экспериментально, иначе форма ванны расплава не будет совпадать с реальным отображением. На сегодняшний день модель Голдака наилучшим образом описывает всевозможные методы дуговой сварки [12].

При анализе процессов сварки, характеризующихся высокой плотностью энергии, т. е. лазерной, электронно-лучевой или плазменной сварки, обычно используется модель конического источника с нормальным распределением (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Модель трехмерного конического распределения плотности мощности излучения

Математическая модель объемной плотности теплового потока в материал описывается следующим образом [20]:

$$Q(x,y,z) = Q_0 e^{\frac{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}{r_0^2(z)}};$$
(1.4)

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} (z - z_e), \qquad (1.5)$$

где Q_0 – максимальное значение объемной плотности теплового потока; r_e и r_i – параметры размеров верхнего и нижнего радиуса конуса соответственно; z_e и z_i – параметры длины конуса; x, y и z – координаты точек (рис. 1.4).

Аналогично подходу Голдака модель с движущимся источником энергии при численном моделировании требует уточнения и калибровки перед использованием в реальных задачах. При правильно подобранных коэффициентах становится возможным предсказать распределения температурных полей, напряжений и деформаций. Примером может послужить калибровка гауссова распределения через коэффициенты *a* и *b*, при значениях которых выше двух распределение преобразуется в так называемое супергауссово распределение:

$$q_{\rm max} = aq_0 e^{-b\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}}.$$
 (1.6)

Для технологически сложных процессов, таких как гибридная сварка, возможна модификация источника энергии с комбинацией существующих моделей. Примером может послужить модель с использованием двойного эллипсоидного и конического распределений [21].

Существует возможность использования самоопределяемых моделей источников энергии, а также других вычислительных методов, как, например, метод собственных деформаций, но они часто требуют первоначальной калибровки на основе ранее выданных решений [17].

1.2 Описание гидродинамики ванны расплава сталей и сплавов

Гидродинамика ванны расплава, образующейся во время лазерной сварки, представляет собой сложный физический процесс. Этот поток расплава –

результат взаимодействия многих движущих сил [22 – 26], роль которых – давление абляции, эффекты парового шлейфа, поверхностное натяжение, гравитация, возможные индуцированные электромагнитные силы и другое определена не полностью, поскольку их относительная важность зависит от условий процесса обработки, например, когда меняются скорость сварки или интенсивность падающего лазера. Для улучшения понимания этих сложных процессов проводят различные эксперименты и анализируют ЭВОЛЮЦИЮ динамики ванны расплава для диапазона скоростей сварки, более широкого, чем обычно используется. Пять типичных гидродинамических режимов могут быть определены путем изменения скорости сварки от нескольких м/мин до нескольких десятков м/мин и, таким образом, различают некоторые движущие силы. В качестве конечного результата подчеркивается важность динамического давления, создаваемого паровым шлейфом, испускаемым фронтом "замочной скважины" (keyhole).

Течение Марангони играет важную роль в переносе тепла и массы для таких высокотемпературных процессов, как выращивание кристаллов, сварка, наплавка, литье и электронно-лучевая плавка. При выращивании монокристаллов кремния влияние колебательного течения Марангони на введение полос роста впервые обсуждалось Ченом и Уилкоксом в 1972 году [27]. Существование течения Марангони в расплавленном кремнии было доказано с помощью экспериментов в условиях микрогравитации в космосе на борту зондирующей ракеты в 1983 году Эйером и другими [28], которые обнаружили образование полос роста в монокристаллах даже в условиях микрогравитации, где поток, вызванный плавучестью, был подавлен. Для объяснения эффекта Марангони на поверхности расплава поверхностное натяжение имеет важное значение. Кин [29] обсудил измерении загрязнение кислородом при поверхностного натяжения И рекомендовал использовать метод левитации, который является бесконтейнерным процессом и обеспечивает отсутствие загрязнения от измерительных приборов. Хорошо известно, что направление потока в сварочной ванне зависит от загрязнения поверхности и что это связано со свариваемостью [30; 31].

20

Направление потока контролируется температурным коэффициентом поверхностного натяжения для расплавленных сталей; загрязняющие вещества – кислород и сера. В системе плавления электронно-лучевой головкой поток Марангони является доминирующим из-за интенсивного нагрева на поверхности расплава [31].

В данной работе поверхностное натяжение высокотемпературных металлических расплавов обсуждается с точки зрения эффекта Марангони в высокотемпературных процессах с добавленной долей веществ, в частности, с точки зрения влияния кислорода и серы. Также допускается дополнительная обработка адсорбции кислорода. Место конвекционных потоков в процессе лазерной наплавки в ванне расплава показано на рис. 1.5



Рисунок 1.5 – Моделируемая форма наплавки под воздействием 0,5 кВт гауссова лазерного луча через 0,8 с после включения лазера и структура потоков металла внутри наплавки: *а* – поперечный разрез экспериментально полученного наплавочного валика (направление потока металла при затвердевании видно вдоль микротрещин); *б* – схема трех вкладов в результирующую картину течения внутри наплавки и ванны расплава [32]

Эффект Марангони проявляется на поверхности расплава, где градиент поверхностного натяжения существует параллельно поверхности расплава (рис. 1.6). В случае рис. 1.6, *б* – распределение температуры однородно на поверхности расплава, но температура на поверхности ниже, чем внутри. Случай рис. 1.6, *а* называется термокапиллярным или концентрационно-капиллярным

эффектом в зависимости от происхождения разницы поверхностного натяжения на поверхности расплава. Случай рис. 1.6, б является классическим определением эффекта Марангони. Для случая, представленного на рис. 1.6, а, из-за напряжения сдвига на поверхности расплава, поверхность расплава с большим поверхностным натяжением тянет за собой поверхность с малым поверхностным натяжением. Под поверхностью течение происходит из-за вязкости расплава. Градиент поверхностного натяжения вызван не только разницей температур, но и разницей концентраций или адсорбции примесей. Они называются термокапиллярным и концентрационно-капиллярным потоками соответственно. Для случая рис. 1.6, б термокапиллярный поток локален из-за колебания неоднородности поля Формируется температуры свободной поверхности расплава. на ванны вертикальное течение для компенсации потери объема. Этот поток поставляет расплав с высокой температурой снизу. Поэтому, как только этот поток генерируется, он поддерживает разницу температур на поверхности расплава, чтобы обеспечить непрерывный поток.



Рисунок 1.6 – Определение эффекта Марангони: *а* – термокапиллярный эффект; *б* – классический эффект Марангони [31]

Баланс сил на поверхности жидкости для описания течения Марангони записывается следующим образом:

$$-\mu_f \frac{\partial u}{\partial z} - \mu_g \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial C_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial x}, \qquad (1.7)$$

где μ_f и μ_g – динамическая вязкость для жидкой и газовой фаз; u – скорость; z и x – оси ординат; T, σ , C_i и Γ – температура, поверхностное натяжение, концентрация растворенного вещества на поверхности жидкости и количество адсорбированных атомов на единицу площади соответственно.

В процессе сварки вольфрама в среде инертного газа для стали сварочной фактором, форма ванны является ключевым определяющим свариваемость [30]. Из-за большой разницы температур между центром и краем поверхности ванны течение Марангони происходит на поверхности расплава. Центр поверхности расплава нагревается горелкой, тогда как на краю расплав сосуществует с твердым телом; температура расплава самая низкая на краю. Температурный коэффициент поверхностного натяжения зависит от загрязнения, особенно от кислорода и серы. Поскольку температурный коэффициент отрицателен в восстановительной атмосфере, направление течения Марангони является исходящим; поток происходит от центра ванны к краю (рис. 1,7, *a*) [33]. неглубокая, Ванна однако, если поверхностное натяжение показывает положительный температурный коэффициент из-за загрязнения, поток Марангони происходит от края к центру ванны; форма ванны глубокая и ожидается хорошая свариваемость (рис. 1,7, δ).

Этот положительный температурный коэффициент поверхностного натяжения был зарегистрирован для систем, адсорбированных с элементами группы 16, такими как кислород, сера и т.д. [34–36]. Сера также влияет на температурный коэффициент поверхностного натяжения для нержавеющей стали [30; 33]. Поверхностное натяжение указывает максимальное значение при данной температуре; это происходит из-за десорбции с повышением температуры (рис. 1,7, *в*). В таких случаях течение осложняется внутри сварочной ванны.

В работах S.Lu и других экспериментально и количественно изучено влияние O₂ и CO₂ в защитном газе в аргоновой среде на образование оксидного слоя, форму сварочной ванны и структуру потока [38]. В этом случае O в жидкой ванне поступает из O₂ или CO₂, а поверхность расплава покрыта оксидным слоем, несмотря на это наблюдалось существование течения Марангони, влияющее на форму ванны. Когда концентрация O₂ или CO₂ в газе Ar ниже 0,6 об.%, оксидный слой тонкий. Этот тонкий оксидный слой на периферийной области ванны легко разрушается, и поверхность сварочной ванны подвергается воздействию защитного газа.



Рисунок 1.7 – Зависимость между температурным коэффициентом расплавленной стали и формой сварочной ванны для: *a* – отрицательной; *б* – положительной; *в* – смешанной производной поверхностного натяжения по температуре

Таким образом, имеет место течение Марангони. Когда содержание кислорода в сварочной ванне ниже 100 мд (содержание O_2 или CO_2 в защитном газе ниже 0,2 об.%), направление конвекции Марангони на квазисвободной поверхности является исходящим; ванна широкая и неглубокая. Когда содержание кислорода превышает 100 мд (O_2 или CO_2 составляет более 0,2 об.%), направление конвекции Марангони меняется с внешнего на внутреннее; форма сварочной ванны становится глубокой и узкой. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода в расплаве (O_2 или CO_2 составляет более 0,6 об.%) на периферийной области поверхности жидкой ванны образуется толстый жесткий оксидный слой. Однако в центральной области ванны все еще существует внутренняя конвекция Марангони, переносящая горячий расплав с поверхности на дно. В результате форма сварного шва снова становится широкой, но выпуклой ко дну.

Для расплавленного железа температурный коэффициент поверхностного натяжения, как было замечено, изменялся с отрицательного на положительный вместе с увеличением концентрации кислорода [33]. Озава и другие [38; 39] измерили поверхностное натяжение расплавленной нержавеющей стали SUS304 (8%Ni-18%Cr-Fe) методом осциллирующей капли с использованием электромагнитной левитации в широком диапазоне температур, включая переохлажденное состояние 170К. Измерение проводилось в двух типах окружающей атмосферы – с низким парциальным давлением 10-28 МПа, измеренным на выходе из системы потока газа, и с высоким парциальным давлением 10-21 МПа. Атмосфера с низким парциальным давлением была подготовлена потоком смеси 5% H₂-Ar, тогда как смесь 5% H₂-He использовалась для понижения температуры. Для приготовления условий с высоким содержанием парциального давления использовался поток чистого газа Ar или He, остаточная концентрация O₂ составляла <0,1 мд как для Ar, так и для He. Отрицательный температурный коэффициент наблюдался в атмосфере с низким содержанием парциального давления, тогда как в случае с высоким содержанием парциального давления положительный температурный коэффициент наблюдался при более низкой температуре (1620-2070 К), а температурный коэффициент менялся на отрицательное значение выше 2070 К. Это можно объяснить десорбцией кислорода с поверхности расплава. Примечательно, что температурная зависимость показала почти такое же поведение выше 2070 К.

Течение Марангони играет ключевую роль в переносе тепла и массы для выращивания кристаллов, наплавки и сварки. Движущей силой течения Марангони являются различия поверхностного натяжения на поверхности расплава. Поскольку теплофизические свойства расплавленных материалов должны измеряться с малой погрешностью для использования в крупномасштабных численных расчетах, существует значительная потребность в улучшении или новых разработках в измерительной технике. Метод колеблющейся капли с использованием техники левитации – наиболее точное средство измерения. В настоящее время принято, что поверхностное натяжение должно измеряться при однозначноопределенном парциальном давлении кислорода, поскольку поверхностное натяжение расплавленных металлов, сплавов и полупроводников чувствительно к парциальному давлению кислорода окружающей атмосферы. Методы электромагнитной левитации в последнее время были значительно усовершенствованы, поскольку этот метод использовался в условиях микрогравитации на борту космического челнока и будет использоваться на международной космической станции. Используя современные измерительные технологии, будут получены высоконадежные теплофизические свойства, включая поверхностное натяжение.

1.3 Способы ультразвукового воздействия на ванну расплава

Введение ультразвука в технологические процессы – создание литых деталей, сварка и наплавка – приводит к дендритной фрагментации, что напрямую влияет на прочностные характеристики готовой конструкции. Полости являются основным фактором развития фрагментации дендритов. Ударная волна, возникающая в момент схлопывания пузырька-вакуума, инициирует разрушение дендритных клеток в зоне размягчения кристаллизующегося металла. Эта ударная волна перераспределяется в поле звуковых колебаний, уже присутствующих при ее распространении через расплавленную среду, что приводит к росту центров кристаллизации.

Наиболее полно изучены и описаны процессы, возникающие в относительно больших масштабах расплава материала [40 – 42]. Описаны акустические течения, возникающие в ванне расплава, и образование кавитационных пузырьков. Показано, что при определенных частотах можно достичь гомогенной структуры в зоне термического воздействия.

При этом на сегодняшний день бурно развивается новая область технологической науки «аддитивные технологии».

Перечислим некоторые особенности данного технологического процесса, которые осложняют сформированные подходы в моделировании данного процесса:

1) формирование ванны расплава малых масштабов;

26

2) бо́льшие (относительно литья) скорости плавления и кристаллизации (порядка 10⁷ К/с) [43], так как используются источники высокой энергии;

3) трудность в подведении источника ультразвука напрямую в жидкую фазу вещества, т.е. существование посредника в виде подложки;

4) необходимость решения многофазных связанных задач термоупругости и тепломассопереноса.

Тем не менее в последние годы некоторые исследователи достигли успехов в решении перечисленных проблем. В работе [44] представлен способ прямого лазерного нанесения в ультразвуковом поле турбинных лопаток из сплава Ti6Al4V. Показано, что при наплавке образца твердость металла увеличивается более чем в 1,1 раза в случае применения акустических колебаний частотой 100 кГц и мощностью более 1 кВт. Акустические колебания при нанесении покрытия на детали из Ti6Al4V приводят к образованию в структуре равноосных областей зерен. Варьируя частоту и мощность колебаний, можно выбирать, где формировать равноосную структуру при наращивании образца.

возбуждение Ультразвуковое BO время затвердевания является альтернативным методом модификации микроструктуры, который позволяет избежать корректировки состава исходного материала. Существует множество механизмов, с помощью которых ультразвуковое воздействие может влиять на микроструктуру во время затвердевания. Два механизма, которые находятся в центре внимания большинства работ, это кавитация и акустическое течение. Основной механизм, с помощью которого кавитация вызывает модификацию микроструктуры, заключается в росте и имплозивном коллапсе изначально небольшой полости внутри ванны расплава, которая испускает интенсивные ударные волны с высокими температурами и давлениями [45]. Эти ударные волны могут разрушать растущие кончики дендритов и действовать как новые точки зародышеобразования для равноосного роста. Кроме того, давление может вызывать локальное переохлаждение внутри ванны расплава, что может способствовать гетерогенному зародышеобразованию [45]. Акустическое течение, при котором профиль потока ванны расплава изменяется из-за поглощения

акустической энергии, может изменять микроструктуру за счет уменьшения локальных градиентов температуры, рассеивания зародышеобразующих частиц по всей ванне расплава и переплавки дендритов, которые затем отрываются и служат новыми зародышеобразующими частицами [45]. Тап и другие предоставили подробный обзор аддитивных технологий с использованием поля, включая аддитивные технологии с использованием ультразвукового/акустического поля [46]. Todaro и другие продемонстрировали возможность использования кавитации посредством ультразвука высокой интенсивности для улучшения микроструктуры во время обработки с направленным энергетическим осаждением (DED) Ti-6Al-4V, Inconel 718 и нержавеющей стали [47; 48]. В дополнение к более равноосной морфологии зерен Todaro и другие наблюдали уменьшение размера зерен, что является преимуществом из-за обратной зависимости от прочности материала [49]. Высокоскоростные видеонаблюдения прямой лазерной наплавки с ультразвуковым возлействием приписали изменения микроструктуры комбинированному воздействию кавитации, акустического течения и поглощения ультразвука [50].

Применимость более ранней работы по прямой лазерной наплавке Ti-6Al-4V к расплавлению металла в заранее сформированном слое остается неопределенной. Процесс литья имеет скорости затвердевания и температурные градиенты, которые на порядки больше, чем процессы наплавки. Ян и другие продемонстрировали использование ультразвукового воздействия во время литья сплава на основе кобальта и обнаружили, что ультразвуковое воздействие уменьшило средний размер зерна с 81 до 53 мкм с небольшим улучшением свойств на растяжение и микротвердости [51]. Однако детали ультразвуковых механизмов, ответственных за эти наблюдения, не обсуждались. Тилита и другие [52], изучавшие применимость ультразвукового воздействия во время литья сплава нержавеющей стали, получили результаты, показавшие уменьшение размера зерна примерно на 20% и уменьшение соотношения сторон зерна примерно на 50%. Они также обнаружили, что ультразвуковое воздействие немного увеличило нанотвердость, уменьшило анизотропию модуля упругости в плоскостях XY против YZ и уменьшило твердость по Виккерсу [53]. Го и другие [49] изучили целесообразность использования акустического поля частотой 2 кГц для поддержки температуры при обработке нержавеющей стали 316L, армированной карбидом вольфрама. Они приписали уменьшение количества пор и концентраций напряжений акустическому течению и кавитации и обнаружили незначительное уменьшение размера зерна.

Ванг и другие [95] изучили влияние ультразвука на измельчение микроструктуры алюминиевого сплава с использованием синхротронной рентгеновской дифракции in situ. Они определили, что ультразвук вызвал повышение скорости охлаждения из-за изменения структуры потока и более равноосную структуру зерна центральной линии и аналогичных по сравнению с контрольным образцом ванны расплава. Однако в этих работах не исследовались физические механизмы, которые могли вызвать эти изменения материала.

В работе [56] был произведен расчет и верификация проволочно-дугового аддитивного производства изделия с введением ультразвуковых колебаний подложки. Показано, что введение ультразвука не влияет на качественную картину течения, но увеличивает общую скорость потока и, как следствие, тепломассоперенос, что способствует гомогенизации расплава. Авторами был произведен только CFD расчет с введением ультразвука в виде граничного условия.

Ультразвуковое воздействие может ослабить растягивающее напряжение в верхней части сварного шва и немного повысить сжимающее напряжение в нижней части сварного шва, что потенциально может улучшить механические свойства [57].

Расчетный размер зоны, в которой возможно активное воздействие на фронт затвердевания ультразвуковой деформацией, составляет до 1 мм [58]. Авторами был приведен расчет и экспериментальная верификация влияния ультразвука на ванну расплава, сформированную высокочастотным импульсным лазером.

В реализованной многофазной модели влияния ультразвуковых колебаний на форму свободной поверхности в процессе лазерной сварки показано, что рабочая амплитуда воздействия на ванну расплава находится в промежутке от 4 до 6 мкм [59]. При амплитудах меньше 4 мкм ванна не меняет своей формы, а при амплитуде более 6 мкм происходит расплескивание расплава.

1.4 Методы моделирования многофазных сред

В середине XX века были достигнуты успехи в области пузырькового кипения и созданы первые модели падения давления в двухфазных потоках, особенно для химической и перерабатывающей промышленности. В частности, Локхарт и Мартинелли в 1949 году [60] представили модель падения давления из-за трения в горизонтально разделенных двухфазных потоках и ввели параметры, которые используются до сих пор. В период с 1950 по 1960 гг. интенсивные исследования в аэрокосмической и ядерной областях дали стимул развитию советскими учеными Телетовым и другими математических моделей двухфазных потоков. Бейкер (1965) провел исследование вертикальных режимов течения [62; 63].

Многофазные потоки, особенно в нефтяной промышленности, широко изучаются с 1970-х гг. в связи с растущей зависимостью мировой экономики от топливной энергетики [63; 64].

В 1980-х гг. моделирование многофазных потоков получило дальнейшее развитие за счет моделирования не только давления и расхода, но и закономерностей течения, обусловленных различиями в наклоне и диаметре труб. В 1990-х гг. развитие вычислительных мощностей привело к использованию все более сложных методов моделирования многофазных потоков, что позволило перенести потоки, ранее ограниченные одномерными задачами, в трехмерные модели [63].

Одним из аспектов, который стоит исследовать при моделировании течений в ванне расплава при ультразвуковом воздействии, является деформация свободной поверхности жидкого металла. Для этого необходимо рассмотреть существующие численные подходы моделирования многофазных сред.

Разделение фаз в численном моделировании основано на скорости объема или массы. Чтобы определить подходящую математическую модель для потока

жидкости, такие факторы, как физический процесс и режим потока, должны быть описаны заранее. Было разработано несколько математических моделей для надлежащего моделирования потока жидкости. Исследование многофазного потока все еще имеет несколько препятствий из-за сложностей, связанных с математическими моделями. Однако уравнения Навье – Стокса могут широко использоваться для изучения многофазных потоков, а возможности оборудования в проведении численных исследований, основанных на уравнениях Навье – Стокса, все еще далеки от удовлетворительного результата.

Из-за присутствия нескольких фаз, многофазные модели течения очень сложно описать и измерить по сравнению с однофазными потоками. Распределение скоростей трудно рассчитать, поскольку скорость каждой фазы в отдельной точке неизвестна.

Существует несколько методов моделирования многофазных потоков, включая метод Эйлера – Лангранжа, который решает уравнения Навье – Стокса и рассматривает жидкую фазу как континуум. Дискретная фаза решается путем отслеживания каждой конкретной частицы, что влечет решение системы уравнений связанных частиц. Дискретная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой [66].

Многофазные среды Эйлер – Эйлер подхода решаются с использованием уравнений сохранений массы, импульса и энергии (при необходимости) и усреднением решения по объему для каждой конкретной фазы [67], к которой соотносят понятие объемной доли.

Самый простой метод категоризации непрерывных многофазных потоков – рассматривать каждую фазу независимо. Эта концепция, известная как модель однородного потока, впервые была предложена советскими учеными в 1960-х годах. Предположения в этой модели следующие:

- скорости газовой и жидкой сред равны;

– двухфазная среда находится в термодинамическом равновесии [67; 68].

Сверх того, сложная модель, например, связанная с турбулентностью, химической реакцией или массопереносом, выводит проблему на новый уровень

31

сложности [69]. По этой причине создание как реалистичных, так и более простых моделей является ключевым фактором для моделирования многофазного потока жидкости [70; 71]. Наиболее часто используемые математические подходы, такие как эмпирические корреляции, могут быть реализованы следующим образом [72; 73]:

• volume of Fluid (VOF) – отрывные потоки, свободные поверхностные потоки;

• лагранжева многофазная система (LMP) – потоки капель, отслеживание отдельных точечных частиц, частицы не взаимодействуют;

• *метод дискретных элементов (DEM)* – потоки частиц, решение траекторий отдельных объектов и их столкновений внутри непрерывной фазы;

• эйлеровы многофазные течения (ЕМО) – дисперсные течения, потоки частиц, пузырьковые течения, тепло- и массообмен при кипении, межфазный массообмен;

• эйлерова/лагранжева модель дисперсной фазы (DPM) – позволяет учитывать взаимодействия каждой отдельной частицы с твердыми средами в расчетной области;

• *модель Эйлера-Эйлера (EEM)* – учитывается взаимодействие частиц со стенкой, взаимодействие частиц со стенкой обычно не учитывается;

• эйлерово-гранулярная модель (EGM) – рассматриваются как взаимодействие частиц со стенкой, так и взаимодействие частиц с частицами;

Помимо перечисленных, в литературе можно найти и другие разнообразные модели в зависимости от типа потока жидкости.

Для исследуемых в данной работе процессов число Вебера мало, поэтому капельные процессы не рассматриваем, но стоит учесть в отдельности методы связанных сред.

1.4.1 Memod Volume of Fluid

Volume of Fluid (VOF) метод, разработанный для поверхностного отслеживания многофазных систем, включающих несмешивающиеся режимы

жидкости. Таким образом, для этого метода интерфейс между фазами жидкости имеет большое значение. Таким образом, метод VOF может отслеживать объемную долю каждой фазы жидкости во всей области исследования, учитывая, что сумма объемных долей обеих фаз равна единице. Для этого решается единый набор транспортных уравнений на обе фазы, в которых определяются их компоненты скорости. Аналогично этому единое уравнение энергии используется при оценке общей температуры двух фаз. В модели VOF уравнение сохранения массы задается уравнением, включающим фазу (z) в основное уравнение сохранения массы:

$$\nabla(\varphi_z, \rho_z, V_z) = 0. \tag{1.8}$$

Для этого уравнения сумма всех фаз будет

$$\sum_{z=1}^{n} \varphi_z = 1.$$
 (1.9)

1.4.2 Memod Mixture

В интерфейсах модели Mixture (смеси) комбинация частиц и жидкости рассматривается как единый текущий континуум с макроскопическими свойствами, такими как плотность и вязкость. Фазы состоят из одной дисперсной и одной непрерывной фаз. Модель смеси действительна, если непрерывная фаза является жидкостью, а дисперсная состоит из твердых частиц, капель жидкости или пузырьков газа. Однако для пузырьков газа в жидкости предпочтительнее модель пузырькового течения. Модель смеси основана на следующих предположениях:

- плотность каждой фазы приблизительно постоянна;

обе фазы имеют одинаковое поле давления;

 время релаксации частиц мало по сравнению с временными масштабами макроскопического потока.

Плотность смеси определяется по формуле:

$$\rho = \varphi_f \rho_f + \varphi_s \rho_s \,, \tag{1.10}$$

.. . . .

Объемный поток для каждой фазы равен

$$\vec{j}_f = \varphi_f \vec{u}_f \\ \vec{j}_s = \varphi_s \vec{u}_s$$
(1.11)

где \vec{u}_f и \vec{u}_s – векторы скорости непрерывной и дисперсной фазы соответственно.

Скорость используемой здесь смеси представляет собой усредненную по объему плотность потока или усредненную по объему скорость смеси \vec{j} , определяемую как

$$\vec{j} = \vec{j}_f + \vec{j}_s.$$
 (1.12)

1.4.3 Модель Эйлера

Модель Эйлера похожа на модель Mixture за исключением того, что основные уравнения решаются независимо для фаз. Эта модель предполагает, что две фазы являются взаимопроникающими континуумами, имеющими сильную связь между собой, возникающую из-за давления и коэффициентов межфазного обмена. Уравнение непрерывности в модели Эйлера для фазы базовой жидкости и второй фазы задается следующими уравнениями:

$$\nabla \left(\boldsymbol{\varphi}_{f}, \boldsymbol{\rho}_{f}, \boldsymbol{V}_{f} \right) = 0; \qquad (1.13)$$

$$\nabla \big(\varphi_s, \rho_s, V_s \big) = 0. \tag{1.14}$$

Кроме того, суммирование объемной доли равно единице:

$$\varphi_f + \varphi_s = 1. \tag{1.15}$$

Вывод по главе 1

В гл. 1 показана важность численного анализа течений в ванне расплава при оценке степени воздействия лазерного излучения на вещество. Описываются

основные модели источников теплового воздействия и указывается, что для моделей лазерного воздействия наиболее подходящим является модель гауссова распределения, основанная на распределении плотности энергии по нормальному закону. Показано, что для реального предсказательного анализа необходим подбор уточняющих коэффициентов. Описаны основные процессы, происходящие в ванне расплава в жидком металле. Особенно выделено конвекция Марангони и описаны способы воздействия на направление потока, за счет либо изменения градиента температуры, либо процента содержания серы в веществе. Описан механизм воздействия ультразвуковых колебаний на ванну расплава и способы его формирования.

В данной работе предполагается изучение наиболее распространенного способа подвода ультразвуковых коленей, а именно воздействие на ванну расплава через приложение к подложке сонотрода.

Рассмотрены основные существующие методы многофазного моделирования, из которых сделаны выводы:

• модель Эйлера требует больше времени моделирования, чем модель VOF, использующая ту же сетку. Тем не менее, модель Эйлера тратит меньше времени, если используется сетка с небольшим количеством ячеек сетки из-за независимости сетки. Более того, в пузырьковом потоке модель Эйлера точнее модели VOF на 5% по прогнозу доли пустоты;

• модель VOF представляет собой метод отслеживания поверхности и находит свое применение, когда интерфаза между фазами представляет интерес. Ее применение включает стратифицированный поток, свободный поверхностный поток, заполнение и т. д.

Глава 2. МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

На основе известных представлений о моделировании термокапиллярной конвекции в данной главе представлена двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали 08Х16Н11М3, предложены приближенные функции для учета эффективной удельной теплоемкости и вязкости при переходе твердого тела в жидкость, подробно рассмотрено влияние лазерного излучения на материал, а также представлена тепловая модель и исследован вклад конвекции Марангони в формирование ванны расплава.

2.1 Постановка задачи

Исследовался процесс нагрева и образования ванны расплава нержавеющей стали 08Х16Н11М3. Для предоставления реалистичной модели лазерного нагрева при лазерном воздействии и обеспечения сходимости и вычислительной эффективности численного моделирования в исследовании сделаны следующие упрощения и предложения:

1. Число Рейнольдса (Re) потока жидкости в процессе лазерной наплавки намного меньше $5 \cdot 10^4$, поэтому предполагается, что жидкий металл в ванне расплава представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость с ламинарным течением.

2. В качестве подложки и порошкового материала рассматривается нержавеющая сталь 08Х16Н11М3 с изотропными и однородными свойствами.

3. В отличие от лазерной сварки в порошковом слое (LPBF), где испарение порошка происходит при высокой плотности лазерной энергии $\left(\operatorname{порядка} q > 10^9 \frac{\mathrm{Br}}{\mathrm{m}^2} \right)$ и небольшом размере пятна, температура не достигает точки кипения металла при лазерной наплавке. Поэтому потерями массы и тепла, вызванными испарением, и возникающим в результате давлением отдачи пара пренебрегают.
Численное моделирование проводилось методом конечных объемов в программном модуле Ansys CFX. Сталь инициализировалась как жидкость со свойствами твердого материала и высокой вязкостью до температуры плавления и со свойствами жидкого металла после температуры плавления.

2.2 Управляющие уравнения и условия однозначности

Для решения задачи используется система уравнения сохранений: момента, энергии и массы. Далее подробно описывается каждое из уравнений с соответствующими им граничными условиями.

2.2.1 Описание тепловой задачи и воздействия лазера на вещество

<u>Управляющие уравнения.</u> Нелинейное уравнение для переноса тепла в общем виде, где слагаемые слева направо представляют собой изменение температуры по времени, поток тепла, диффузионный поток тепла и объемный источник тепла, представлено как:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot \left(\vec{u} \left(\rho E + p \right) \right) = \nabla \cdot \left(k \nabla T + \left(\overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{u} \right) \right) + Q, \qquad (2.1)$$

где ρ – плотность материала, зависящая от температуры; T – скалярное поле температуры; \vec{u} – векторное поле скорости вещества, ∇ – оператор Набла; k – коэффициент теплопроводности; $\overline{\tau}$ – вязкие напряжения; Q – объемный источник тепла.

Для задачи лазерного нагрева единственный возможный объемный источник тепла – лазерное излучение. Но так как лазерное излучение поглощается по закону Бугера – Ламберта – Бера [74] (2.2), а глубина проникновения лазерного излучения в стали примерно равна 10⁻⁸ м (скин-слой), поток лазерного излучения можно задать в виде граничного условия, а не как объемный источник тепла (рис. 2.1)

$$q(z) = q_0(1-R)e^{-z/\delta},$$
 (2.2)

где q₀ – мощность лазерного излучения на поверхности материала; R – коэффициент отражения поверхности; δ – глубина проникновения света.



Рисунок 2.1 – Иллюстрация падения плотности мощности лазерного излучения по закону Бугера – Ламберта – Бера

<u>Граничные условия.</u> На верхней части материала задается граничное условие теплового потока:

$$\vec{q} = -k\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \vec{q}_{\text{лаз}} + \vec{q}_{\text{конв}} + \vec{q}_{\text{рад}}, \qquad (2.3)$$

являющегося суммой тепловых потоков: лазерного излучения, заданного гауссовым распределением

$$q_{_{\Pi a3}} = a \frac{P}{\pi r^2} (1 - R) e^{-b \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{r^2}},$$
(2.4)

конвективной

$$q_{\rm KOHB} = -h_c \left(T - T_0\right) \tag{2.5}$$

и радиационной

$$q_{\rm pag} = -\varepsilon \sigma \left(T^4 - T_0^4 \right) \tag{2.6}$$

теплоотдачи (здесь k – коэффициент теплопроводности материала; \vec{n} – вектор нормали к поверхности; $\vec{q}_{\text{лаз}}$ – тепловой поток лазера; $\vec{q}_{\text{конв}}$ – конвективная

теплоотдача; \vec{q}_{paq} — радиационная теплоотдача; P — мощность лазерного излучения; x_0 , y_0 — координаты центра лазерного пятна, заданного в декартовой системе координат; a, b — коэффициенты, характеризующие увеличение значение пика функции и скорость возрастания/убывания соответственно; r — радиус лазерного пятна; h_c — коэффициент конвекции; T_0 — температура внешней среды; ε — коэффициент излучения поверхности; σ — постоянная Больцмана).

Для описания граничного условия воздействия лазерного излучения был использовано супергауссово распределение. При моделировании процессов лазерной обработки материалов принято брать значения *a* и *b* равными 3, которые и характеризуют супергауссово распределение [76; 77]. Это связано с тем, что при использовании коэффициентов со значениями, равными 1, происходит рассеивание энергии у основания функции, как это показано на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Графики функций: *а* – классическое гауссово распределение; б – супергауссово распределение

Проинтегрировав функцию (2.4) со значениями коэффициентов a и b, равными 1, в интервале от $-\infty$ до ∞ и сравнив значение той же функции с интегралом в пределах от -3 до 3, получим, что 15,74% плотности мощности от общего значения находятся вне радиуса воздействия лазерного пучка.

Проведя аналогично все вычисления для функции (2.4) со значениями коэффициентов *a* и *b*, равными 3, получим, что потери плотности энергии составляют 1,44%.

На остальных гранях материала задано граничное условие нулевого теплового потока (2.7):

$$\vec{q} = -k\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0.$$
(2.7)

2.2.2 Уравнения гидродинамики с учетом термокапиллярной конвекции

Течение на свободной поверхности ванны расплава происходит за счет ненулевого градиента поверхностного натяжения и изменения плотности в ванне расплава. Следовательно, уравнения сохранения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho \vec{u} \right) = 0; \qquad (2.8)$$

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u} \cdot \nabla\right)\vec{u}\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{f} , \qquad (2.9)$$

где p – давление; μ – динамическая вязкость; \vec{f} – массовые силы, должны быть включены в систему уравнений совместно с (2.1) для учета поля течения.

<u>Граничные условия.</u> При формировании ванны расплава на свободной поверхности образуются конвективные течения (эффект Марангони), направленные к или от оси *OZ* [78]. Направление течения зависит от направления градиента температуры и значения градиента поверхностного натяжения (2.10):

$$\vec{\tau} = -\mu \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}}, \qquad (2.10)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения; \vec{s} – тангенциальный вектор поверхности.

Апsys CFX позволяет задавать для граничного условия проекции сдвиговых напряжений τ_x, τ_y, τ_z . Так как решалась задача с плоской ванной расплава, можно спроецировать вектор тангенциальной составляющей на плоскость *XY*:

$$\tau_x = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}; \qquad (2.11)$$

$$\tau_{y} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}.$$
(2.12)

2.3 Описание численной модели

Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами, указанными на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема расчетного домена с размерами и указанием на источник нагрева

Источник нагрева расположен на верхней части расчетного домена. На поверхности, по периметру которой изображены красные маркеры, устанавливалось условие симметрии.

2.3.1 Пространственная и временная дискретизация модели

Неоднородные сетки используются для детального расчета роста жидкой ванны расплава, прогнозирования скорости течения и распределения температуры. Стоит отметить, что размер элементов в окрестности сварочной

ванны должен быть достаточно мал, чтобы учесть фазовый переход от твердого металла к жидкому. Это относится к ситуациям, когда значения параметров динамической вязкости и удельной теплоемкости в диапазоне температур твердое тело-жидкость меняются быстро и скачкообразно.

Размер элементов подбирался экспериментально. Общее количество элементов сетки: 291400. Минимальный размер ячейки в области зарождения жидкой ванны расплава: 0,05 мм.

Параметры процесса нагрева и настройки решателя представлены в табл. 2.1.

Название	Значение	Единица измерения
Мощность	2000	Вт
Радиус пятна нагрева	3	ММ
Шаг расчета	0,0001	с
Начальное время	2	с
Время расчета	2,5	с

Таблица 2.1 – Параметры лазерного излучения и численного решателя

2.3.2 Описание физических свойств исследуемого материала

В качестве основного материала расчетной области была выбрана нержавеющая сталь 08Х16Н11М3, теплофизические свойства которой представлены на рис. 2.4.

Для учета фазового перехода от твердого металла к жидкому в диапазонах температур солидус и ликвидус уравнения удельной теплоемкости и динамической вязкости модифицируются в соответствии со следующими уравнениями:

$$\mu(T) = \mu_{\pi} + (\mu_{c} - \mu_{\pi}) / \left(1 + e^{\frac{T - T_{n\pi}}{a}}\right); \qquad (2.13)$$

$$C_{p}(T) = C_{p_{\pi}} + \left(C_{p_{c}} - C_{p_{\pi}}\right) \left/ \left(1 + e^{\frac{T - T_{\pi\pi}}{a}}\right) + \frac{H_{\pi\pi}}{T_{\pi\pi} - T} \cdot e^{-\frac{(T - T_{\pi\pi})^{2}}{a^{2}}}, \quad (2.14)$$

где μ_n – динамическая вязкость жидкого металла; μ_c – динамическая вязкость твердого металла; C_{p_n} – удельная теплоемкость жидкого металла; C_{p_c} – удельная теплоемокость твердого металла; H_{nn} – скрытая теплота плавления; T_{nn} – температура плавления, равная среднему значению между температурой солидуса и ликвидуса; a – температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода.



Рисунок 2.4 – Теплофизические свойства 08Х16Н11М3: *а* – плотность [79]; *б* – теплопроводность [79]; *в* – динамическая вязкость; *г* – удельная теплоемкость [79]

Другие физические и теплофизические постоянные для материала 08Х16Н11М3, используемые в данной работе, приведены в табл. 2.2.

Название	Символ	Значение	Единица измерения	Источник
Температура ликвидуса	$T_{_{ m I\!I}}$	1673	K	80
Температура солидуса	T_c	1649	K	80
Скрытая теплота плавления	$H_{\rm nn}$	$4 \cdot 10^{5}$	<u>Дж</u> кг	81

Таблица 2.2 – Физические свойства 08Х16Н11М3

Название	Символ	Значение	Единица измерения	Источник
Коэффициент конвекции	h _c	5	$\frac{BT}{M^2K}$	82
Коэффициент излучения поверхности	3	0,8	-	83
Динамическая вязкость жидкого металла	μ_{π}	0,006	Па∙с	84
Динамическая вязкость твердого металла	μ_c	20	Па∙с	-
Удельная теплоемкость жидкого металла	$C_{p_{\pi}}$	458,98	<u>Дж</u> кг · К	85
Удельная теплоемкость твердого металла	$C_{_{p_c}}$	692,98	<u>Дж</u> кг · К	85
Градиент поверхностного натяжения	$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$	0,00019	$\frac{H}{M \cdot K}$	86
Температура плавление	<i>Т</i> _{пл}	1660	K	-
Температура внешней среды	T_0	300	К	-
Температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода	а	3	К	-
Коэффициент отражения поверхности	R	0,5	-	-
Постоянная Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$	<u>Дж</u> К	-

Окончание таблицы 2.2

2.4 Результаты численного решения

На рис. 2.5 представлена динамика формирования ванны расплава при лазерном воздействии с учетом конвекции Марангони (рис. 2.5, *a*) и без учета конвективных течений (рис. 2.5, *б*). Зеленым цветом отмечена область с температурой ниже температуры ликвидуса, красным – область с температурой выше температуры ликвидуса.



Рисунок 2.5 – Эволюция ванны расплава с течением времени: *a* – без учета конвекции Марангони; *б* – с учетом конвекции Марангони

Так как нагрев лазерным излучением происходит по закону Гаусса и градиент поверхностного натяжения для исследуемого материала имеет положительный знак, течение направлено к центру лазерного пятна и вниз вблизи оси *OZ*. Таким образом, тепло переносится вдоль оси *OZ*, увеличивая глубину проплава материала.

Глубина проплава зависит от скорости течения – в нашем случае примерно 0,5 м/с (рис. 2.6, *a*), которая в свою очередь зависит от градиента поверхностного натяжения.



Рисунок 2.6 – Векторы скорости в ванне расплава: *a* – с учетом эффекта Марангони; *б* – без учета эффекта Марангони

При этом наблюдаются практически нулевые скорости течения при отсутствии конвекции Марангони (рис. 2.6, б), за исключением помех, вызванных численными погрешностями программного комплекса Ansys CFX.

Предполагается, что, изменяя профиль интенсивности лазерного пучка, можно интенсифицировать (увеличивая градиент моды излучения) или исключить течения (используя плоские или квазиплоские источники излучения). Увеличение скорости течений позволит гомогенизировать структуру материала после кристаллизации. Отсутствие скоростей ведет к кристаллизации с образованием направленных вдоль градиента температур структур.

Возможно варьировать скоростные потоки либо изменяя профиль лазерного излучения, либо вводя дополнительные тепловые воздействия на свободную поверхность ванны расплава.

Также проведен расчет с движущимся источником лазерного излучения. Результаты динамики изменения формы ванны расплава и структуры течений показаны на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Динамика формирования ванны расплава в разные моменты времени при движении источника энергии вдоль оси ОХ в положительном направлении

Видно, что при движении лазера течения стремятся к центру теплового пучка. При этом необходимо заметить, что направление движения (от или к центру пучка) и скорость потока зависят от содержания серы в веществе и чистоты материала. В этом случае данный феномен ведет к увеличению глубины проплава материала и без учета конвекции Марангони. Качественно и количественно оценить реальность данного процесса нельзя.

2.5 Верификация численного решения

Проведены два эксперимента на нержавеющей стали 08Х16Н11М3 с фиксированными временем воздействия, диаметром лазерного пучка, которые задавались программно, и с разной мощностью излучения.

Для проведения эксперимента использовался лазерный иттербиевый волоконный лазер ЛС-6-К производства фирмы IPG Photonics, представленный на

рис. 2.8, а, б [87]. Для проявления зоны термического воздействия использовался процесс электролитического травления. Визуальное исследование и последующие замеры глубины и ширины ванны расплава производились с помощью инвертированного микроскопа AXIO Observer.A1m, представленного на рис. 2.8, *в*.









Рисунок 2.8 – Оборудование для проведения эксперимента и исследования образцов: *а* – оптоволоконный лазерный источник ЛС-6-К; *б* – лазерная головка; *в* – инвертированный микроскоп AXIO Observer.A1m

После замеров глубины и ширины ванны расплава была подготовлена модель на основе программного комплекса Ansys 2022R2 и модуля CFX. Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами, указанными на рис. 2.3. Источник нагрева расположен на верхней части расчетного домена. Так как CFX не позволяет решать двумерные задачи, использовался трехмерный подход с использованием условия симметрии на разрезе диаметра лазерного пучка.

Параметры процесса нагрева и настройки решателя для физических и численных экспериментов при разных мощностях лазерного воздействия и фиксированных диаметра и времени воздействия представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры лазерного излучения и численного решателя экспериментов

	Эксперимент 1		Эксперимент 2	
Параметр	311011011110	Единица	Знананна	Единица
	Эначение	измерения	Эначение	измерения
Мощность	1500	Вт	2000	Вт
Диаметр пятна нагрева	3	ММ	3	ММ
Шаг расчета	0,0001	с	0,0001	с
Время расчета	1	с	1	с

После проведения физического эксперимента была проведена серия численных экспериментов с варьированием коэффициентов *a* и *b* и фиксацией физических свойств материала и параметров лазерного излучения. На рис. 2.9 сопоставляются физические и численные эксперименты с оптимальными параметрами коэффициентов *a* и *b*, равными 2.8 и 1,6 соответственно.



Рисунок 2.9 – Результаты физических и численных экспериментов с замерами глубины и ширины ванны расплава: *a* – физический эксперимент с мощностью лазера 1500 Вт; *б* – численный эксперимент с мощностью лазера 1500 Вт; *в* – физический эксперимент с мощностью лазера 2000 Вт; *г* – численный эксперимент с мощностью лазера 2000 Вт;

Количественно сравнение характеристик ванны расплава в виде размеров и относительной погрешности показано в табл. 2.4. Очевидно, что при увеличении мощности лазера увеличивается относительная погрешность при измерении глубины и ширины ванны расплава. Это связано с тем, что при высокой мощности воздействия лазерного излучения должны учитываться граничные условия парообразования, давления насыщенных паров и оптический пробой как механическое воздействие на свободную поверхность ванны расплава. Тем не менее, даже без учета дополнительных граничных условий относительная погрешность при высоких мощностях не достигает 20%.

Параметр	Экспері	Относительная	
Параметр	физический	численный	погрешность, %
	Эксперимент 1. Мощность лазера 1500 Вт		
Ширина	0,003992	0,003981	0,276
Глубина	0,000548	0,000496	9,489
	Эксперимент 2. Мощность лазера 2000 Вт		
Ширина	0,004032	0,004230	4,911
Глубина	0,001268	0,001148	9,464

Таблица 2.4 – Результаты физических и численных экспериментов и их сопоставление

Вывод по главе 2

В гл. 2 представлена нелинейная двухфазная математическая модель, описывающая процесс плавления и течений в ванне расплава с учетом сил поверхностного натяжения для нержавеющей стали 08X16H11M3. Показано влияние конвекции Марангони на форму ванные расплава и скорости течений в ней. Предложен способ управления полем скоростей в ванне расплава для будущей структуры переплавленного Подобраны контроля материала. коэффициенты для модели воздействия лазерного излучения с использованием супергауссова распределения. Результаты расчетов верифицированы С использованием лазерной установки.

Глава З. СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ И ГИДРОДИНАМИКИ РАСПЛАВА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

3.1 Постановка задачи

Исследовалось влияние колебаний на течение расплавленного металла в кювете, порожденное эффектом Марангони от лазерного излучения, заданного гауссовым распределением. Численное решение подразумевает введение двух расчетных доменов, в одном из которых решается дифференциальное уравнение упругости, а в другом гидродинамическое дифференциальное уравнение с учетом полной энергии системы. Для приближения к процессу аддитивного производства оба домена представляют собой нержавеющую сталь 08X16H11M3 в разных агрегатных состояниях – твердом И жидком. При решении задачи деформация свободной поверхности. Моделирование рассматривалась не осуществлялось методом конечных элементов (Ansys Transient Structural) и методом конечных объемов (Ansys CFX), объединенных через общий связанный модуль ANSYS System Coupling.

3.2 Математическое описание термопрочностной и гидродинамической задач

<u>Управляющие уравнения.</u> Для моделирования распространения возмущений в твердом теле при переменном механическом воздействии на дно изделия использовалось классическое уравнение движения с учетом сил инерции, записанной в векторной форме:

$$\nabla \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{F} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}, \qquad (3.1)$$

где $\vec{\sigma}$ – тензор напряжений; \vec{F} – вектор внешних объемных сил; ρ – плотность; t – время; \vec{u} – векторное поле скоростей. Компоненты тензора напряжений представим как:

$$\sigma_{xx} = 2 \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xx} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz});$$

$$\sigma_{yy} = 2 \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{yy} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz});$$

$$\sigma_{zz} = 2 \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{zz} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx});$$

$$\sigma_{xy} = 2 \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xy}, \sigma_{yz} = 2 \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{yz}, \sigma_{xz} = 2 \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xz},$$
(3.2)

где E – модуль Юнга; v – коэффициент Пуассона; ε_{ij} – относительная деформация при i, j = 1, 2, 3.

Компоненты деформаций запишем как:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial \upsilon_{x}}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial \upsilon_{y}}{\partial y}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial \upsilon_{z}}{\partial z};$$

$$2\varepsilon_{xy} = 2\varepsilon_{yx} = \frac{\partial \upsilon_{x}}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon_{y}}{\partial x};$$

$$2\varepsilon_{yz} = 2\varepsilon_{zy} = \frac{\partial \upsilon_{y}}{\partial z} + \frac{\partial \upsilon_{z}}{\partial y};$$

$$2\varepsilon_{xz} = 2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial \upsilon_{x}}{\partial z} + \frac{\partial \upsilon_{z}}{\partial x},$$
(3.3)

где υ_i – смещения при i = x, y, z.

Выражая компоненты тензора напряжений из (3.2) и подставив их в (3.1), получим уравнения равновесия в перемещениях или уравнение Ламе:

$$\begin{aligned} &\left(\lambda+\zeta\right)\frac{\partial\theta}{\partial x}+\zeta\Delta u_{x}+\rho X=\rho\frac{\partial^{2}u_{x}}{\partial t^{2}};\\ &\left(\lambda+\zeta\right)\frac{\partial\theta}{\partial y}+\zeta\Delta u_{y}+\rho Y=\rho\frac{\partial^{2}u_{y}}{\partial t^{2}};\\ &\left(\lambda+\zeta\right)\frac{\partial\theta}{\partial z}+\zeta\Delta u_{z}+\rho Z=\rho\frac{\partial^{2}u_{z}}{\partial t^{2}}, \end{aligned}$$
(3.4)

где $\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ – объемная деформация; λ и ζ – коэффициенты Ламе; X, Y, Z – компоненты напряжения массовой силы. Запишем его в векторной форме:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \zeta) \nabla^2 \cdot \vec{u} + \zeta \Delta \vec{u} + \rho \vec{F}, \qquad (3.5)$$

где \vec{F} – напряжение массовой силы.

<u>Граничные условия.</u> На верхней части детали задается граничное условие теплового потока, аналогичное формуле (2.3).

Также, на верхней части твердой зоны заданы граничные условия нулевого смещения, а на свободной поверхности жидкого металла – условие термокапиллярной конвекции в виде

$$\vec{\tau} = -\mu \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}}, \qquad (3.6)$$

где μ – динамическая вязкость; γ – коэффициент поверхностного натяжения; \vec{n} – вектор нормали поверхности; \vec{s} – тангенциальный вектор поверхности.

Механические колебания на дне подложки задавались через условие переменного смещения плоскости, как показано на рис. 3.1:

$$u_{z}(t) = \frac{A}{2} + \frac{A}{2}\sin\left(2\pi tv - \frac{\pi}{2}\right),$$
(3.7)

где *А* / 2 и *v* – амплитуда и частота колебаний подложки.



Рисунок 3.1 – График функции (3.7) с параметрами A = 1 и v = 2

На всех остальных гранях задавались условия свободных колебаний и нулевого теплового потока.

Произведена аналитическая оценка количества энергии, проходящей через межфазную границу, для чего использовалось вычисление коэффициента пропускания энергии из одной среды в другую:

$$\psi = \frac{4Z_1Z_2}{\left(Z_1 + Z_2\right)^2} \cdot 100\% = 47,8\%, \qquad (3.8)$$

где $Z_1 = \rho \sqrt{\frac{E}{\rho}}$; $Z_2 = \rho \sqrt{\frac{K_s}{\rho}}$; E – модуль Юнга; K_s – изоэнтропический модуль

объемной упругости жидкого металла.

3.3 Механизм взаимодействия термомеханического

и гидродинамического решателей

Передача данных при решении связанных задач гидродинамики (описанной в 2.2.2) и прочности осуществлялась в каждый момент времени в обе стороны таким образом, что от прочностного решателя передавались показатели смещения на границе раздела доменов, а от гидродинамического решателя в прочностной передавались данные о силе воздействия в каждом узле вычислительной сетки на границе раздела доменов [88]. Принципиальная схема работы представлена на рис. 3.2.

3.4 Описание численной модели

Расчетная область представляет собой два параллелепипеда: жидкий (Fluid Domain) и твердый (Solid Domain) домены. Размеры доменов указаны на рис. 3.3. Источник лазерного излучения расположен в верхней части жидкого домена.

Размеры элементов у жидкого и твердого доменов различны и подбирались экспериментально, исходя из оптимального соотношения качество-скорость.



двусторонней силовой связи [87]



Рисунок 3.3 – Описание расчетных областей

Применялась регулярная тетрагональная сетка. Количество элементов жидкого домена 1920 с размерами ячейки 2,5·10⁻³ мм. Количество элементов твердого домена 63000 с размерами ячейки 4·10⁻⁴ мм.

Параметры процесса нагрева и настройки решателя представлены в табл. 3.1. Начальная температура жидкого домена была принята 1673 К, соответствующая температуре ликвидуса.

Парамотр	30000000	Единица
Параметр	Эначение	измерения
Мощность	0,1	Вт
Радиус пятна нагрева	0,01	ММ
Шаг расчета	$2,5 \cdot 10^{-8}$	с
Начальное время	0	с
Время расчета	$3 \cdot 10^{-5}$	с

Таблица 3.1 – Параметры процесса нагрева и настройки решателя

Функция (3.7), описывающая механическое воздействие на подложку детали, представляет собой синусоиду со сдвигом по фазе на четверть для того, чтобы начальный показатель смещения был равен нулю. Амплитуда колебаний равна 1 мкм, частота колебаний равна 100 кГц.

На рис. 3.4 представлена функция, используемая при решении задачи, и графическое отображение смещения на жидкий домен. Красными маркерами на графике отмечены контрольно-временные точки, по которым проводился анализ влияния механического воздействия на поток в жидкой ванне расплава нержавеющей стали 08Х16Н11М3.



Рисунок 3.4 – График функции, описывающий смещение нижней части твердого домена и соответствующая иллюстрация деформации жидкого домена

3.5 Результаты расчетов и анализ результатов

Рассматривается влияние периодического воздействия на ванну расплава в контрольно-временных точках, указанных на рис. 3.4. На рис. 3.5 показаны



графики скоростей вдоль центральной оси *OZ* жидкого домена с передачей ультразвукового воздействие (Velocity with UV) и без (Velocity without UV).

Рисунок 3.5 – Графики скоростей течения вдоль центральной оси *OZ* жидкого домена с ультразвуковым воздействием и без

В моменты времени, соответствующие максимальной и минимальной амплитудам колебаний (контрольно-временные точки: *b*, *d*, *f*, *h*, *j*, *l*), скорости потока с и без ультразвукового воздействия подобны друг другу вследствие нулевого смещения (деформации) элементов сетки.

В моменты времени, соответствующие средней амплитуде колебаний (контрольно-временные точки: *a*, *e*, *i*), наблюдается торможение потока

вследствие движения деформируемой поверхности к верхней части домена, в то время как в контрольно-временных точках *c*, *g*, *k* наблюдается ускорение потока из-за движения деформируемой поверхности вниз. При таком периодическом движении поверхности на скорость движения жидкости влияет соответствующий импульс от деформации.

В табл. 3.2 приведен анализ максимальной скорости течения на центральной оси жидкого домена, полученной с ультразвуковым воздействием и без. Расчет относительной разности высчитывался по следующей формуле

$$R = \left(\frac{u_{\rm cy3} - u_{\rm 6e3\,Y3}}{u_{\rm 6e3\,Y3}}\right) \cdot 100\%, \tag{3.9}$$

где u_{cy3} – максимальная скорость, полученная с ультразвуковыми колебаниями; u_{6e3y3} – максимальная скорость, полученная без ультразвуковых колебаний.

Контрольно-	Максимальная	Относительная	
временные точки	с УЗК	без УЗК	разность, %
а	0,246948	0,111758	120,97%
С	0,340184	0,269938	26,02%
е	0,291001	0,331612	-12,25%
g	0,415278	0,356166	16,60%
i	0,292412	0,366164	-20,15%
k	0,431457	0,370363	16,50%

Таблица 3.2 – Сравнительный анализ максимальных скоростей течений с и без ультразвукового воздействия

Контрольные точки c, g, k, представленные в табл. 3.2, количественно подтверждают тезис о том, что при движении деформируемой поверхности вниз происходит ускорение общего течения. Противоположный тезис справедлив для точек e, i. В контрольной точке a наблюдается высокая положительная относительная разность скоростей вследствие того, что процесс тепломассопереноса от конвекции Марангони в начальный момент времени на порядок меньше, чем передаваемый импульс от колебания подложки. Это связано с малым градиентом температур от воздействия лазерного источника на поверхности жидкого домена и, как следствие, с медленно развивающимся конвекционным течением.

На рис. 3.6 представлено сравнение по скалярным и векторным полям скоростей в ультразвуковом поле и без него в среднем сечении плоскости *ZX*.



Рисунок 3.6 – Контуры скоростей течений, полученных с ультразвуковыми колебаниями и без них

На контурах скоростей в контрольно-временных точках (*a*, *c*, *d*, *g*, *I*, *k*) наблюдается сглаживание скалярного поля скоростей на нижней части домена вследствие передачи импульса движения от деформируемой поверхности.

Выводы о пропорциональности скоростей течений в контрольно-временных точках (b, d, f, h, j, l) на центральной оси OZ, также справедливы и для скалярного поля в серединном сечении расчетного домена.

Качественно картины течения совпадают с результатами работы [89], которая исследовала схожую ситуацию, но с иной геометрией и без учета потерь энергии при передаче ультразвуковых колебаний через твердую часть домена.

Для развития кавитационного течения в ванне расплава необходимо много больше времени симуляции.

Выводы по главе 3

Рассмотрена созданная трехмерная имитационная гидродинамическая модель процесса лазерной сварки при отсутствии и наличии ультразвукового воздействия на ванну расплава через твердую часть металла. В последнем случае учитывается конвекция Марангони на поверхности расплава.

Вычислительные эксперименты показали:

– моделирование процессов лазерной сварки с ультразвуковым воздействием возможно при использовании инструментария вида ANSYS System Coupling, позволяющего решить связанную задачу гидродинамики и прочности;

– в моменты времени, когда амплитуда колебаний ультразвуковой волны имеет максимум или минимум, скалярное и векторное поля скорости с ультразвуковым воздействием и без него пропорциональны. Изменение скорости течения минимально вследствие нулевой деформации поверхности жидкого металла, не получающей дополнительного импульса воздействия на поток;

– в моменты времени, которым соответствует среднее значение амплитуды колебаний, скалярное и векторное поля скорости при ультразвуковом воздействии и без него непропорциональны. Передаваемый импульс движения деформируемой твердой поверхности интенсифицирует скорость течения при движении (деформации) объема жидкого металла вниз и тормозит течение при движении (деформации) его вверх. В обоих случаях отмечено, что деформация приводит к сглаживанию скалярного поля скорости на нижней части жидкого объема.

Глава 4. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЙ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ

Цель данной главы – на основе ранее разработанных решений и выводов сформулировать нелинейную динамическую многофазную трехмерную математическую модель лазерной сварки и наплавки в ультразвуковом поле и численно решить ее для различных частот воздействия.

4.1 Решение двумерной задачи точечной лазерной сварки

Цель данного раздела – математически описать процесс точечной лазерной сварки в УЗ поле, генерируемом сонотродом.

Создана двумерная гидродинамическая модель с учетом стороннего воздействия. Исследована структура течения в расплавленном металле под воздействием и без воздействия ультразвука различных частот. Определены усредненные характеристики, влияющие на структуру течения при воздействии ультразвукового поля на расплавленную ванну. Проведена верификация модели на основе экспериментальных данных.

4.1.1 Постановка задачи

Генерация ультразвуковых колебаний, которые находятся в диапазоне 20 кГц – 1000 МГц, требует крайне высокой дискретизации по времени (порядка 1 нс). В связи с этим для повышения вычислительной производительности предполагаются следующие упрощения и допущения:

1) как и в большинстве работ, посвященных моделированию лазерной сварки, полагается, что число Рейнольдса намного меньше 5.10⁴. Как следствие, выбрана ламинарная модель течения жидкого металла;

2) обрабатываемый материал считается изотропным и однородным;

3) плотность мощности лазерного излучения не превышает 10¹⁰ Вт/м², это означает, что потерями массы и тепла, вызванными испарением, и возникающим в результате давлением отдачи пара пренебрегают.

Численное моделирование проводилось методом конечных объемов в программном модуле Ansys Fluent с применением пользовательских функций «User-Defined Function» (UDF). Сталь инициализировалась как жидкость со свойствами твердого материала и высокой вязкостью до температуры плавления.

4.1.2 Управляющие уравнения

Динамика тепломассопереноса формируемой ванны расплава описывается тремя управляющими уравнениями: неразрывности, импульса и энергии.

Уравнение сохранения массы с исключенным источником массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\vec{\rho u} \right) = 0, \qquad (4.1)$$

где ρ – скалярное поле плотности; \vec{u} – векторное поле скоростей; t – время.

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} H) = \nabla(k \nabla T) - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{рад}} + Q_{\text{лаз}}, \qquad (4.2)$$

где *H* – энтальпия; *k* – коэффициент теплопроводности; *Q*_{лаз} – объемный источник лазерного воздействия; *Q*_{конв} – объемный источник конвекционной теплоотдачи; *Q*_{рад} – объемный источник радиационной теплоотдачи.

Уравнение сохранения момента:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \left(\vec{u} \cdot \vec{u} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \vec{f}_{bf} + \vec{f}_{p}, \qquad (4.3)$$

где p – скалярное поле давления; \vec{g} – ускорение свободного падения; \vec{f}_{bf} – сила противодействующего момента для устранения паразитных течений; \vec{f}_p – силы давления (вызванные переменным воздействием ультразвукового источника).

Распределение давления вследствие высокочастотного воздействия на подложку можно описать как

$$P(x, y, z, t) = P_{\text{arm}} + A \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \sin\left(2\pi v t\right), \qquad (4.4)$$

где *P*_{атм} – атмосферное давление; *A* – амплитуда колебания; λ – длина волны ультразвуковых волн; ν – частота колебания.

Для учета ультразвукового воздействия в уравнение (4.3) необходимо добавить силу воздействия переменного давления, определяемого с учетом (4.4) по уравнению:

$$\vec{f}_{p} = -\frac{1}{\rho} \nabla P(x, y, t).$$
(4.5)

На рис. 4.1 изображено распределение скалярного поля переменного давления во всем вычислительном домене с учетом уравнения (4.4). Визуализация осуществлялась в постпроцессоре Ansys CFD-Post.



Рисунок 4.1 – Распределение поля переменного давления во всем вычислительном домене

Так как сталь была представлена как флюид со свойствами твердого вещества, даже большие значения динамической вязкости не могут полностью остановить течение в домене. Чтобы исключить скорости, в домене для твердой фазы был введен момент силы, противодействующий движению элементарных жидких частиц в виде уравнения:

$$\vec{f}_{bf} = \alpha \cdot velocity_multiplier \cdot \vec{u}, \qquad (4.6)$$

где *velocity_multiplier* – множитель для регулировки работы противодействующей силы в промежутке от 0 до 1.

Значение *velocity_multiplier* зависит от температуры и характеризует, включение/отключение тормозящей силы согласно формуле:

$$velocity_multiplier = \frac{-\rho \cdot 10^{12}}{1+e^{\frac{T-T_{mn}}{3}}},$$
(4.7)

где $T_{\rm пл}$ – температура плавления, равная среднему значению от температур солидуса и ликвидуса.

4.1.3 Граничные условия

Рассеяние тепла, вызванное конвективным теплообменом и тепловым излучением, определяется формулами соответственно:

$$q_{\rm конв} = -h_c \left(T - T_0 \right); \tag{4.8}$$

$$q_{\rm pag} = -\varepsilon \sigma \left(T^4 - T_0^4 \right), \tag{4.9}$$

где h_c – коэффициент конвекции; T – скалярное поле температур; T_0 – температура окружающей среды; ε – коэффициент излучения поверхности; σ – постоянная Больцмана.

Сила Марангони это сила сдвига горячей капиллярной трубки, находящейся в контакте со свободной границей раздела, обусловленная градиентом поверхностного натяжения $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ и представляющая собой

$$\vec{f}_{\rm M} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}},\tag{4.10}$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения; \vec{s} – тангенциальный к поверхности единичный вектор.

Стоит отметить, что температурный коэффициент поверхностного натяжения оказывает существенное влияние на конвекцию в ванне расплава.

Неизотермическая конвекция представляет собой симметричную обратную циркуляцию в поперечном сечении. Когда температурный коэффициент поверхностного натяжения отрицательный, левая часть будет вытекать против часовой стрелки, а правая – по часовой стрелке.

4.1.4 Описание модели

В качестве материала для расчетов использовалась нержавеющая сталь 08Х16Н11М3. Свойства материала аналогичны работам [90; 91], за исключением введенного коэффициента поверхностного натяжения для учета меняющейся свободной поверхности ванны расплава и термокапиллярной конвекции. Материал задавался как жидкость, но изменял теплофизические свойства в процессе фазового перехода первого рода.

Для всех величин при фазовом переходе использовалась сигмоида как аппроксимирующая функция.

Расчетная область представляла собой прямоугольник с размерами, указанными на рис. 4.2. Объемный источник лазерного нагрева располагался в вверху и середине расчетной области.



Рисунок 4.2 – Схема расчетного домена с указанием размеров

Расчетный домен представлял собой равномерную декартову сетку с линейным размером ребра 0,05 мм. Общее количество элементов составляет 2000.

На левой, правой, и нижней частях расчетной области использовалось граничное условие нулевого потока, соответствующее условию теплоизоляции.

Производилось четыре расчета: 1) без введения ультразвуковых колебаний; 2) с введением ультразвуковых колебаний частотой 20 кГц; 3) с введением ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц; 4) с введением ультразвуковых колебаний частотой 60 кГц.

Неизменяемые параметры процесса нагрева, воздействия ультразвука и настройки решателя приведены в табл. 4.1.

Параметр	Значения	Единица измерения
Мощность	1500	Вт
Радиус пятна нагрева	1	ММ
Шаг расчета	0,000001	с
Длина волны ультразвука в жидком металле	0,3	ММ

Таблица 4.1 – Настройки численного эксперимента

На рис. 4.3 представлены графики изменения давления по времени в произвольной зафиксированной точке пространства для разных частот воздействия.



Рисунок 4.3 – График синусоидальной зависимости давления от времени в фиксированном месте пространства с метками дискретизации для частот: $a - 20 \text{ к}\Gamma \text{ц}; 6 - 40 \text{ к}\Gamma \text{ц}; 6 - 60 \text{ к}\Gamma \text{ц}$

Значение амплитуды колебания соответствует работе [92].

Использовалась PISO схема, так как она стабильнее для колебаний давления в процессе решения. На межфазной границе вследствие высоких скоростей плавления образуются термокапиллярные течения. Для стабилизации скорости и энергии для обоих переменных использовалась first-order upwind схема дискретизации.

Шаг по времени равен 10⁻⁶ секунд, так как он способен обеспечить оптимальную дискретизацию синусоидельного изменения давления по времени.

Непрерывная линия показывает аналитическое значение давления, точка – значение давления, которое будет передаваться на каждом вычислительном шаге.

4.1.5 Результаты моделирования и сравнение с экспериментом

Результаты численных решений динамики температурного и скоростного полей для референсного случая без воздействия ультразвуковых колебаний представлены на рис. 4.4.

Черный контур показывает межфазную границу между твердым материалом и жидким металлом. На 0,003 секунде начинается формирование ванны расплава. Начиная с 0,013 секунд наблюдается формирование течений на свободной поверхности ванны расплава под действием термокапиллярных сил. Межфазная граница ровная. К 0,03 секунде моделирования фиксируется установившееся поле течений. Формируется вихрь, с крупными застойными зонами в четырех областях ванны расплава. Геометрия ванны расплава в сечении имеет ярко выраженный перегиб, связанный со сформированными течениями и переносом тепла. Данная картина подтверждается экспериментом в работе [90]. Температурное поле вытянуто вдоль оси симметрии ванны расплава, что может вести к неравномерной итоговой микроструктуре.



Рисунок 4.4 – Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева без УЗ

На рис. 4.5 представлена динамика формирования ванны расплава с настройками лазера, аналогичными референсному численному эксперименту, но в УЗ поле частотой 20 кГц.

Время начала формирования ванны расплава аналогично референсному решению. На 0,013 секунде наблюдается равномерная ванна расплава и отсутствие поверхностных направленных течений, так как колебания нивелируют любые сторонние течения. Ванна расплава, сформированная на 0,03 секунде, имеет менее выраженный перегиб относительно референсного решения, течения хаотичны и равномерно распределены магнитуды скорости. Температурное поле равномернее относительно референсного решения.



Рисунок 4.5 – Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева в УЗ поле частотой 20 кГц

На рис. 4.6 представлена динамика формирования ванны расплава с настройками лазера, аналогичными референсному численному эксперименту, но в УЗ поле частотой 40 кГц.

Время начала формирования ванны расплава аналогично предыдущим решениям. На 0,013 секунде наблюдается равномерное распределение температуры относительно референсного решения и криволинейная межфазная

граница, вследствие периодической структуры поля скоростей. Итоговая форма межфазной границы имеет несимметричный вид. Именно на этой частоте возникает периодическая структура колебания центрального течения (аналогично вихревым дорожкам Кармана). При увеличении времени моделирования это приведет к увеличению площади ванны расплава.



Рисунок 4.6 – Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева в УЗ поле частотой 40 кГц

На рис. 4.7 представлена динамика формирования ванны расплава с настройками лазера, аналогичными референсному численному эксперименту, но в УЗ поле частотой 60 кГц.



Рисунок 4.7 – Динамика скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава в процессе лазерного нагрева в УЗ поле частотой 60 кГц

Как видно из рис. 4.7 при воздействии УЗ частотой 60 кГц формируется наиболее равномерное распределение поля скоростей. Это связано с увеличением моды колебаний и образованием большего количества разнонаправленных течений со скоростью большей, чем термокапиллярные и конвекционные силы.

Для анализа скоростных характеристик при периодическом влиянии необходимо брать средние значения. На рис. 4.8 представлены графики плотности распределения значений скоростей в ванне расплава за время 0,025 – 0,03 с. Для этого была написана программа на языке MATLAB, которая считывала поля

скоростей в каждой вершине сетки и по заданным отрезкам скоростей подсчитывала их количество. Увеличение частоты УЗ поля ведет к образованию течений с меньшей дисперсией скоростей.



Рисунок 4.8 – График плотности распределения скоростей в ванне расплава при разных частотах УЗ поля: — – – 0 кГц; — – 20 кГц; — – 40 кГц; — – 60 кГц

Выводы, сделанные ранее, подтверждаются подсчитанными значениями математического ожидания функции плотности и среднеквадратичным отклонением для каждой из приведенных частот УЗ поля (табл. 4.2). Для случая с введенным УЗ частота в 60 кГц показывает меньший разброс скоростей, что влечет к равномерности потоков во всей ванне расплава.

Частота, кГц	Математическое ожидание скорости, м/с	Среднеквадратичное отклонение, м/с
0	0,19	0,21
20	0,91	0,98
40	0,54	0,57
60	0,41	0,43

Таблица 4.2 – Значения характеристик кривых распределений

Также с помощью самописной программы на языке MATLAB проанализировано поле скоростей путем построения карты соответствий между референсным решением и разными частотами воздействия УЗ. На рис. 4.9

показано, что ультразвуковое поле с частотой 60 кГц формирует наиболее равномерную структуру скалярного поля магнитуд скоростей.



Рисунок 4.9 – Карта соответствий скалярных полей магнитуд скоростей между референсным решением и решениями с разными частотами ультразвукового воздействия

Работа [93] показывает, что воздействие ультразвуковых колебаний увеличивает температуру в ванне расплава аналогично произведенным численным расчетам в этой статье.

В работе [94] показана зональная разнородная структура зерен в случае, когда плавление материала проводится без ультразвукового воздействия. При использовании ультразвукового воздействия свыше 40 кГц почти полностью отсутствуют зоны вытянутых кристаллов, что свидетельствует об отсутствии зон
застоев, что согласуется с численными экспериментами. Кроме того, в работах [95–97] показано, что на малых частотах ультразвука (15-22 кГц) значительно повышается микротвердость в отдельных зонах термического воздействия. На рис. 4.9 видно, что при данных частотах увеличены средние показатели скоростей и величина дисперсности достигает целых значений.

4.2 Трехмерная многофазная модель лазерной сварки в ультразвуковом поле

Цель данного раздела – математически описать и программно реализовать многофазную модель точечного лазерного нагрева в ультразвуковом поле частотой 40 кГц с учетом тепловых потерь и термокапиллярных течений, проанализировать влияние ультразвуковых колебаний на объем и геометрию ванны расплава по сравнению с классическим подходом, предложить методы стабилизации численного решателя при решении многофазных задач, провести верификацию численной модели с реальным экспериментом.

4.2.1 Постановка задачи

Для предоставления реалистичной модели лазерного нагрева при лазерном воздействии и обеспечения сходимости и вычислительной эффективности численного моделирования в исследовании сделаны следующие упрощения и предложения:

– число Рейнольдса потока жидкости в процессе лазерной наплавки намного меньше 5.10⁴, поэтому предполагается, что жидкий металл в ванне расплава представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость с ламинарным течением;

 – материал подложки и порошковый материал считаются изотропными и однородными;

– моделировался процесс точечной теплопроводной сварки, при котором плотность мощности лазерного излучения не превышает 10⁶ Вт/см². При таких параметрах температура не достигает точки кипения металла при лазерной

обработке, поэтому потерями массы и тепла, вызванными испарением, и возникающим в результате давлением отдачи пара пренебрегают;

волны, генерируемые источником ультразвука, считаются гармоническими,
 а потеря энергии при прохождении через сталь учтена решением отдельной
 задачи механики.

Численное моделирование проводилось методом конечных объемов в программном модуле Ansys Fluent с применением пользовательских функций «User-Defined Function» (UDF). Сталь инициализировалась как жидкость со свойствами твердого материала и высокой вязкостью до температуры плавления.

4.2.2 Математическое описание тепломассопереноса многофазной жидкости

1. Модель VoF [98–101] решает для усредненных законов сохранения двух несмешивающихся несжимаемых жидкостей. Две жидкости индексируются 1 и 2, где поле объемной доли первой жидкости равно α. Свойства транспорта смеси:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2; \qquad (4.11)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2, \qquad (4.12)$$

где ρ – плотность; μ – динамическая вязкость.

Динамика течения жидкой фракции в ванне расплава и газовая среда описаны тремя законами сохранения:

1) закон сохранения массы с исключенным источником массы

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho\alpha \vec{u}) = 0, \qquad (4.13)$$

где α – объемная доля вещества; ρ – скалярное поле плотности; *u* – векторное поле скоростей; *t* – время:

2) закон сохранения момента:

$$\frac{\partial \left(\alpha \rho \vec{u}\right)}{\partial t} + \nabla \left(\alpha \rho \vec{u} \vec{u}\right) = -\alpha \nabla p + \alpha \rho \vec{g} + \vec{f}_{b} + \vec{f}_{M} + \vec{f}_{P}, \qquad (4.14)$$

где p – скалярное поле давления; \vec{g} – ускорение свободного падения; \vec{f}_b – тепловая плавучесть (плавучесть, возникающая вследствие разницы плотности, вызванной изменением температуры); \vec{f}_M – силы Марангони (вызванные градиентами поверхностного натяжения при изменениях температуры); \vec{f}_P – силы давления (вызванные переменным воздействием ультразвукового источника):

3) закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho H) + \nabla(\alpha\rho u H) = \nabla(\alpha k\nabla T) + Q_{\rm KOHB} + Q_{\rm pag} + Q_{\rm mag}, \qquad (4.15)$$

где *H* – энтальпия; *k* – коэффициент теплопроводности; *Q*_{лаз} – объемный источник лазерного воздействия; *Q*_{конв} – объемный источник конвекционной теплоотдачи; *Q*_{рад} – объемный источник радиационной теплоотдачи.

Так как решается многофазная задача и интерфейс между газообразной средой и твердым материалом находится непосредственно в домене, возникает необходимость использования объемных источников нагрева, теплоотдачи и термокапиллярной конвекции, но с привидением их к соответствующей размерности.

Объемный источник лазерного излучения задавался по формуле [102]:

$$Q_{\text{JAB}} = q \cdot e^{\frac{z - z_0}{z_b - z_0} \ln(\chi)} e^{-3\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{r_z^2}}, \qquad (4.16)$$

где

$$q = (1 - A) \frac{3\eta Q_L \ln(\chi)}{\pi (1 - e^{-3}) (z_b - z_0) \left\{ r_0^2 - r_b^2 \chi - 2 \frac{r_b - r_0}{\ln(\chi)} \left[r_0 - r_b \chi - \frac{r_b - r_0}{\ln(\chi)} (1 - \chi) \right] \right\}}; \quad (4.17)$$

x₀, y₀, z₀ – координата центра лазерного пятна; η – энергоэффективность лазера;
 z_b – координата нижнего источника тепла; χ – коэффициент пропорциональности пиковых плотностей мощности между верхней и нижней поверхностями

источника тепла; r_0 – радиус лазерного пятна; r_b – радиус нижнего источника тепла.

Уравнение (4.17) представляет собой модель двухконусного объемного источника тепла с дифрагированными лазерными лучами, которые позволяют учесть изменение плотности мощности объемного источника тепла при деформировании свободной поверхности. На рис. 4.10, *а* схематично показано изменение радиуса лазерного излучения в зависимости от высоты, а на рис. 4.10, *б* представлен реализованный в программе MATLAB способ отслеживания свободной поверхности с последующим применением к нему объемного источника тепла.



а – модель двухконусного объемного источника тепла; б – пример применения функции (4.17)
 на двухфазной задаче с деформированной поверхностью

Рассеяние тепла, вызванное конвективным теплообменом и тепловым излучением, определяется формулами соответственно

$$Q_{\rm конв} = -h_c \left(T - T_0\right) l^{-1}; \tag{4.18}$$

$$Q_{\rm pag} = -\varepsilon \sigma \left(T^4 - T_0^4 \right) l^{-1}, \tag{4.19}$$

где h_c – коэффициент конвекции; T – скалярное поле температур; T_0 – температура окружающей среды; l – ширина межфазного интерфейса; ε – коэффициент излучения поверхности; σ – постоянная Больцмана.

Сила Марангони – сдвиг горячего капилляра, касательного к свободной границе раздела и обусловленного градиентом поверхностного натяжения $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$, ее выражение имеет вид:

$$\vec{f}_{\rm M} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}} l^{-1}, \qquad (4.20)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения; \vec{s} – тангенциальный к поверхности единичный вектор.

Отметим, что в уравнениях (4.18)-(4.20) толщина межфазной границы формируется за счет расчетной сетки и равна расстоянию между соседними центроидами ячеек воздуха и стали при условии их «соседства». На рис. 4.11 представлена схема расчетной сетки и формирование расстояния межфазной границы.

Распределение давления вследствие высокочастотного воздействия на подложку можно описать уравнением

$$P(x, y, z, t) =$$

$$= P_{a_{TM}} + A \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{z}\right) \sin(2\pi v t), \qquad (4.21)$$

где *P*_{атм} – атмосферное давление; *A* – амплитуда колебания; λ – длина волны ультразвуковых волн; ν – частота колебания.



Рисунок 4.11 – Схема расчетной области с указанием фракции ячейки и интерпретации межфазной границы

Для учета ультразвукового воздействия в уравнение (4.12) необходимо добавить силу воздействия переменного давления, которое с учетом (4.21) определяется по уравнению

$$\vec{f}_{p} = -\frac{1}{\rho} \nabla P(x, y, z, t).$$
(4.22)

На рис. 4.22 представлены схематичные изображения распределения полей переменного давления, жидкой фазы металла и антиградиента давления исходя из уравнений (4.19) и (4.20), реализованные в МАТLAB.

Так как сталь была представлена как флюид со свойствами твердого вещества, даже большие значения динамической вязкости не могут полностью остановить течение в домене. Чтобы исключить скорости в домене для твердой фазы был введен момент силы, противодействующий движению элементарных жидких частиц в виде уравнения

$$f_{bf} = \alpha \cdot velocity_multiplier \cdot u$$
, (4.23)

где *velocity_multiplier* – множитель для регулировки работы противодействующей силы в промежутке от 0 до 1.









Рисунок 4.12 – Распределение: *а* – поля переменного давления; *б* – ванна расплава; *в* – антиградиент давления

в

Значение *velocity_multiplier* зависит от температуры и характеризует, включение/отключение тормозящей силы согласно формуле

$$velocity_multiplier = \frac{-\rho \cdot 10^{12}}{1+e^{\frac{T-T_{\text{IIII}}}{3}}},$$
(4.24)

где T_{nn} – температура плавления, равная среднему значению от температур солидуса и ликвидуса.

Применение противодействующей силы в зависимости от температуры представлено на рис. 4.13.

79



Рисунок 4.13 – График зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры и соответствующая ему сигмоида *velocity multiplayer* (для всех величин при фазовом переходе для стабилизации решателя использовалась сигмоида как аппроксимирующая функция)

4.2.3 Использование пользовательских функций в Ansys Fluent

Для формирования собственных физических скалярных полей и граничных условий в Ansys Fluent реализована возможность задавать пользовательские функции (user-defined function) и пользовательские поля (user-defined scalar).

User-defined function формируются на языке программирования с использованием любого текстового редактора и файла с исходным кодом, сохраняемым в расширении .с. Один исходный файл может содержать одну или несколько пользовательских функций.

В рамках исследования пользовательские функции использовались для:

1) отслеживания в реальном времени динамики свободной поверхности жидкого металла;

2) поиска и маркировки межфазной границы между воздухом и сталью;

3) учета конвективных и радиационных тепловых потерь на межфазной границе (согласно формулам (4.18) и (4.19));

4) формирования объемного источника тепла на межфазной границе с учетом перетяжки лазерного пятна (согласно формуле (4.16)); 5) формирование поля переменного по времени давления и силы давления в зоне жидкого металла (согласно 4.22).

Поиск межфазной границы осуществлялся из условия

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \neq 0. \tag{4.25}$$

Оценка кривизны поверхности для задания корректной интенсивности падающего излучения лазера проводилась с использованием уравнения

$$k = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\frac{\partial \alpha}{\partial x_i}}{\frac{\partial \alpha}{\partial x_i}} \right).$$
(4.26)

Программный код на языке С в виде заголовочного файла (.h), в котором объявлены все основные переменные и вспомогательные функции и исполняемый файл (.c), представлены в приложении 1 и 2 соответственно.

4.2.4 Описание численной модели

Расчетная область представляла собой параллелепипед с размерами, указанными на рис. 4.14.



Рисунок 4.14 – Схема расчетного домена:

а – размеры; б – распределение фазы как начального условия

Объемный источник лазерного нагрева располагался в середине расчетного домена.

Расчетный домен представлял собой равномерную декартову сетку с линейным размером ребра 0,1 мм. Общее количество элементов составляет 36000.

Производились два расчета: без введения ультразвуковых колебаний и с введением ультразвуковых колебаний.

Параметры процесса нагрева, воздействия ультразвука и настройки решателя приведены в табл. 4.3.

Параметр	Значение	Единица измерения
Мощность	3000	Вт
Радиус пятна нагрева	0,5	ММ
Шаг расчета	0,0001	с
Начальное время	0	с
Время расчета	0,3	с
Частота колебания сонотрода	40000	Гц
Длина волны ультразвука в жидком металле	0,3	ММ

Таблица 4.3 – Параметры численной модели

Использовалась PISO схема, так как она стабильнее для колебаний давления в процессе решения. На межфазной границе вследствие высоких скоростей плавления образуются термокапиллярные течения. Для стабилизации скорости и энергии для обоих переменных использовалась first-order upwind схема дискретизации.

Шаг по времени равен 2,25⁻⁶ с и был подобран таким образом, чтобы обеспечить подробное описание синусоидального поведения колебания давления (рис. 4.15).

4.2.5 Результаты расчетов и верификация

Динамика формирования ванны расплава без введения ультразвукового поля представлена на рис. 4.16.



Рисунок 4.15 – График синусоидальной зависимости давления от времени в фиксированном месте пространства с метками дискретизации для частоты в 40 кГц



Рисунок 4.16 – Динамика формирования ванны расплава в отсутствие ультразвуковых колебаний

По мере нагрева лазерным излучением увеличивается размер ванны расплава и на поверхности образуются тангенциальные течения, направленные к центру лазерного пятна. Поверхностные потоки, встречаясь в центре, закручиваются и переносят тепло вдоль оси симметрии ванны расплава в глубину. Таким образом, происходит естественное охлаждение поверхности ванны расплава и увеличивается глубина проплавления. Максимальная температура в области смещается вдоль оси *OZ* вглубь. Динамика формирования ванны расплава в ультразвуковом поле представлена на рис. 4.17.



Рисунок 4.17 – Динамика формирования ванны расплава с введением ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц

Введение ультразвукового поля позволяет снизить скорость естественной конвекции и увеличить ширину ванны расплава. Максимальное значение температуры в меньшей степени, относительно плавления без введения ультразвука, растягивается вдоль оси *OZ*. Решение двухфазной задачи позволяет отслеживать деформацию свободной поверхности в виде волнообразных колебаний, которые влияют на скорости конвективных течений и их передачу импульса вглубь ванны расплава. При этом наблюдается асимметричная картина деформации свободной поверхности, что связано с изменяющимся по времени полем давления, которое влияет на направление течения в ванне расплава. Типичная картина распределения антиградиента давления в вычислительном домене приведена на рис. 4.18.

Дисперсность значений антиградиента связана с разреженностью вычислительной сетки.

С помощью инструментов постпроцессора Ansys Fluent измерялись контрольные показатели для сравнения двух экспериментов: объем ванны

расплава, ширина и глубина зоны термического воздействия, средняя магнитуда скорости в ванне расплава.



Рисунок 4.18 – Скалярное поле распределения X составляющей антиградиента давления

Таблица 4.4 – Параметры ванн расплава для момента времени *t* = 0,30555 с

Показатель	Без ультразвука	С ультразвуком	Разница относительно без ультразвука, %
Объем ванны расплава, мм ³	0,64	0,85	32,8
Ширина ванны расплава, мм	1,1	1,2	9,09
Глубина ванны расплава, мм	0,9	0,9	0,0
Средняя скорость потока, м/с	0,107	0.073	-31,69

Анализ проведенных расчетов позволяет сделать вывод о том, что введение ультразвуковых колебаний позволяет увеличить объем зоны термического воздействия и увеличивает ширину ванны расплава. Данные показатели могут быть связаны с тем, что изменяется картина течений по всей области жидкого металла, т.е. уменьшается скорость вдоль оси *OZ* и интенсифицируются течения вдоль жидкого контура.

Для подтверждения корректности численного решения был проведен натурный эксперимент точечного лазерного воздействия на нержавеющую сталь

08Х16Н11МЗ. Процесс лазерного точечного нагрева проводился с помощью иттербиевого волоконного лазера ЛС-6-К производства фирмы IPG Photonics. Мощность лазерного излучения 3 кВт и диаметр лазерного пучка 3 мм. Ультразвуковое воздействие осуществлялось с помощью излучателя Ланжевена мощностью 100 Вт и частотой 40 кГц. Оптические снимки зон термического воздействия для двух проведенных экспериментов представлены на рис. 4.19.



Рисунок 4.19 – Снимки зон термического воздействия после лазерного воздействия: *а* – без использования ультразвука; *б* – с использованием ультразвука

Количественные характеристики натурных экспериментов представлены в табл. 4.5.

Показатель	Без ультразвука	С ультразвуком	Разница относительно без ультразвука, %
Ширина ванны расплава, мм	4,19	4,47	6,68
Глубина ванны расплава, мм	2,28	2,31	1,32

Таблица 4.5 – Значения характеристик натурного эксперимента

Эксперимент показал, что введение ультразвуковых колебаний также способствует увеличению диаметра ванны расплава, что соотносится с численным расчетом.

4.3 Трехмерная многофазная модель лазерной наплавки в ультразвуковом поле

4.3.1 Постановка задачи

Решается трехмерная динамическая задача прямой лазерной наплавки, т.е. задача с движущимся источником энергии и поступающей массой в ванну расплава. Основные допущения аналогичны допущениям, перечисленным в подразд. 4.1.1.

4.3.2 Управляющие уравнения

Уравнения сохранения момента и энергии аналогичны уравнениям (4.14) и (4.15).

В уравнение неразрывности для задачи лазерной наплавки добавляется слагаемая массового источника $S_{\text{масс}}$, исходя из чего уравнение (4.13) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\vec{\rho u} \right) = S_{\text{macc}} \,. \tag{4.27}$$

Слагаемое S_{масс} – функция распределения массового расхода порошкового материала по пространству, которое можно записать как

$$S_{\text{macc}} = \frac{3\eta_{\Pi} \cdot PER}{\pi \cdot r_{\Pi}^2 \cdot H_{\text{muth}}} e^{-\frac{3r^2}{r_{\Pi}^2}},$$
(4.28)

где η_п – эффективное использование порошка; *r*_п – радиус пятна порошка; *PER* – массовый расход подачи порошка; *H*_{мин} – минимальная высота блока на свободном интерфейсе модели; *r* – расстояние от центра пятна.

4.3.3 Описание численной модели

Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами 3x15x6 мм и линейным размером ребра 0,1 мм. Общее количество элементов составляет 270000. Объемный источник лазерного нагрева в начальный момент времени имел координаты (0,0015; 0,0; 0,002) и двигался вдоль оси *X* (рис. 4.20).



Рисунок 4.20 – Изображение расчетного домена с указанием размеров и вычислительной сетки

Проводились два расчета: без введения и с введением ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц.

Физические свойства материалов AISI316 и аргон аналогичны прошлым задачам.

Параметры процесса нагрева, воздействия ультразвука и настройки решателя приведены в табл. 4.6.

Параметр	Значение	Единица измерения
Мощность	1750	Вт
Радиус пятна нагрева	1	ММ
Шаг расчета	0,00005	с
Начальное время	0	с
Время расчета	1	с
Частота колебания сонотрода	40000	Гц
Длина волны ультразвука в жидком металле	0,3	ММ
Скорость движения лазерного источника	0,0055	м/с

Таблица 4.6 – Параметры численной модели

Для стабилизации скорости и энергии для обоих переменных использовалась first-order upwind схема дискретизации. Пороговое значение для невязок устанавливалось 1е-4, невязки их не превышали (рис. 4.21).



Рисунок 4.21 – Графики невязок для массы и проекций скоростей при решении численной задачи лазерной наплавки

4.3.4 Результаты моделирования

Результат численного решения процесса лазерной наплавки без воздействия ультразвуковых колебаний представлен на рис. 4.22.



Рисунок 4.22 – Результаты численного решения процесса лазерной наплавки в виде: *а* – комплексного изображения со скалярным полем температур; *б* – поперечного сечения с контуром температур и векторным полем скоростей

Наблюдаются стабильный рост наплавочного валика с его кристаллизацией после понижения температуры ниже температуры плавления и рост скорости на поверхности валика по направлению к максимальному градиенту температур, а также его торможение после прохождения максимума температуры. У правого и левого оснований образуются завихрения векторного поля скоростей, что при больших массовых расходах и градиентах температур может привести к растеканию жидкого металла на подложку. Все эти скорости формируются вследствие термокапиллярных и гравитационных сил, действующих на жидкий металл.

Векторное поле скоростей и скалярное поле температур в поперечном сечении для случая без воздействия ультразвука показаны на рис. 4.23. Наблюдается тепломассоперенос от центра верхней части валика к основанию, аналогично процессам точечной лазерной сварки.



Рисунок 4.23 – Векторное поле скоростей и скалярное поле температур в поперечном сечении для случая без воздействия ультразвука

Результат численного решения процесса лазерной наплавки с воздействием ультразвуковых колебаний в виде скалярного поля температур и векторного поля скоростей в поперечном сечении представлен на рис. 4.24. Так как ультразвуковое воздействие носит периодический характер, течение не может выйти на стационарный режим и имеет разную структуру в разный момент времени. Но анализ в разный момент времени показывает, что средняя скорость по сравнению с безультразвуковым режимом ниже. Кроме того, геометрия ванны имеет более пологую форму, что может быть связано с влиянием ультразвукового воздействия на поверхностное натяжение жидкого металла.



Рисунок 4.24 – Векторное поле скоростей и скалярное поле температур в поперечном сечении валика в различные моменты времени

В табл. 4.7 представлен анализ геометрии ванны расплава в виде размеров по глубине и ширине и их разность относительно режима без ультразвука.

Таблица 4.7 – Сравнение глубины и ширины ванны расплава для двух режимов наплавки

		Относительная	
Параметр, м вез ультразвука	С ультразвуком	разница, %	
Ширина	0,001	0,001029042	2,90
Глубина	0,00028377	0,000262945	-7,34

Выводы по главе 4

Представлены двумерная однофазная и трехмерная многофазная численные модели лазерной сварки и наплавки для нержавеющей стали 08X16H11M3 в ультразвуковом поле с фазовым переходом первого рода.

Анализ численных и реальных экспериментов позволяет сформировать следующие выводы:

- выявлена возможность численной модели воздействия УЗК на ванну расплава с самописным программным кодом на языке С;

91

- ввод ультразвукового поля в процесс лазерной обработки сталей позволяет устранить застойные зоны, появляющиеся за счет образования вихрей в ванне расплава;

- частота ультразвуковых колебаний влияет на среднюю скорость потока в ванне расплава и дисперсию распределения скоростей, при увеличении частоты средняя скорость и дисперсия снижаются;

- численные эксперименты подтверждены по косвенным признакам согласно экспериментальным работам других авторов;

- наилучшим образом итоговую структуру течений, формирующую однородность без зон кристаллического роста в данных экспериментах, обеспечило поле частотой 60 кГц;

- применение ультразвукового воздействия повышает температуру в ванне расплава за счет торможения естественных конвекционных течений;

- ввод ультразвука позволяет устранить вогнутый изгиб зоны термического воздействия вследствие устранения термокапиллярных течений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является оригинальным экспериментальным, численным и теоретическим исследованием гидродинамики вязкой среды в ванне расплава, сформированной лазерным излучением под влиянием ультразвуковых колебаний.

Итоги выполненного исследования

Основные результаты и выводы работы:

1. Разработана многофазная нелинейная трехмерная нестационарная математическая модель лазерной сварки и лазерной наплавки с учетом конвективных и радиационных тепловых потерь, а также возникновения термокапиллярных течений, которая показала, что невозможно в полной мере моделировать процессы лазерной сварки и наплавки без учета граничного условия конвекции Марангони на свободной поверхности ванны расплава. В качестве источника лазерного излучения при моделировании процессов лазерной обработки предложено использовать супергауссовы распределения с подобранными безразмерными коэффициентами *a* и *b*, которые следует подбирать в соответствии с параметрами лазерной установки. Для установки ЛС-6-К оптимальными значениями коэффициентов являются a = 2,8, b = 1,6. Для классической технологии лазерной обработки без использования ультразвуковых колебаний предложен способ контроля скорости течений в ванне расплава посредством варьирования профиля интенсивности лазера и модулирования мощности излучения.

2. Программно реализована численная модель двумерной и трехмерной многофазных лазерной задач сварки наплавки с учетом внешних И ультразвуковых колебаний гидродинамических В уравнениях. Показана возможность использования инструментария вида ANSYS System Coupling, связанную гидродинамики И позволяющего решить задачу прочности. Представлен и программно реализован математический аппарат для стабилизации решения при моделировании многофазных течений и ультразвуковых колебаний.

3. Установлены влияния разных частот ультразвукового воздействия на структуру течений и конечную форму ванны расплава в процессе лазерной обработки стали. Ввод колебаний в ультразвуковом диапазоне частот в ванну расплава уменьшает скорости естественной конвекции течений на поверхности и в жидкой фазе металла. Показано, что воздействие ультразвукового поля в процессе лазерной обработки сталей позволяет устранить застойные зоны, которые появляются за счет образования вихрей в ванне расплава. Показано, что частота ультразвуковых колебаний влияет на среднюю скорость потока в ванне расплава и дисперсию распределения скоростей. При увеличении частоты средняя скорость и дисперсию распределения скоростей. При увеличении частоты средняя скорость и дисперсия снижаются. Показано, что в моменты времени, в которые амплитуда колебаний ультразвуковой волны имеет максимум или минимум, скалярное и векторное поля скорости с ультразвуковым воздействием и без него пропорциональны друг другу. Изменение скорости течения минимально вследствие нулевой деформации поверхности жидкого металла, не получающей дополнительного импульса воздействия на поток.

Показано, что в моменты времени, которым соответствует среднее значение амплитуды колебаний, скалярное и векторное поля скорости при ультразвуковом воздействии и без него непропорциональны. Передаваемый импульс движения деформируемой твердой поверхности интенсифицирует скорость течения при движении (деформации) объема жидкого металла вниз и тормозит течение при движении (деформации) его вверх. В обоих случаях отмечено, что деформация приводит к сглаживанию скалярного поля скорости на нижней части жидкого объема. При использовании ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц увеличивается объем ванны расплава на 32% и ширина на 9% по сравнению с расчетами без введения ультразвука. Ультразвуковые колебания уменьшают среднюю скорость течения в ванне расплава за счет торможения естественных конвекционных течений, что напрямую влияет на распределение тепла и геометрию зоны термического воздействия лазерного излучения. Наилучшим образом на итоговую структуру течений, формирующую однородную структуру без зон кристаллического роста, в численных и реальных экспериментах обеспечило поле частотой 60 кГи.

94

4. На основе данных, полученных в результате физического эксперимента, проведена валидация численных расчетов для режимов без ультразвукового и с ультразвуковым воздействием. Показано, что с увеличением мощности лазера растет ошибка при измерении глубины и ширины ванны расплава. Это связано с тем, что при увеличении мощности необходимо внедрять в модель новые граничные условия.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Представленная диссертационная работа имеет ярко выраженный фундаментальный уклон, однако все исследования проводились в контексте актуальных прикладных задач.

Основное направление дальнейшей разработки темы диссертации – теоретическое описание и практическое применение ультразвуковых колебаний в процессе прямой лазерной наплавки или в так называемых аддитивных технологиях. Необходимость учета дополнительных объемных источников массы непрерывно поступаемого металлического виде порошка И сильно В изменяющаяся по сравнению с обычной лазерной обработкой межфазная поверхность значительно усложняют процесс численного моделирования. Введение ультразвуковых колебаний в процесс аддитивного выращивания может позволить увеличить геометрию наплавленного валика за счет изменения процессов тепломассопереноса в ванне расплава.

Согласно стратегии научно-технологического развития Российской Федерации перечисленные работы относятся к направлению H1 «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования; создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

95

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fotovvati, B. Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals / B. Fotovvati, S.F. Waynemu, G. Lewis, E.A. Asadi // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – Pp. 1–18. Hindawi Limited. https://doi.org/10.1155/2018/4920718

2. *Rominiyi, A.L.* A critical review of microstructure and mechanical properties of laser welded similar and dissimilar titanium alloy joints / A.L. Rominiyi, P.M. Mashinini // Journal of Advanced Joining Processes. – 2024. – Vol. 9. – P. 100191. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100191

3. *Todaro, C.J.* Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing / C.J. Todaro, M.A. Easton, D. Qiu [et all] // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 37. – P. 101632. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101632

4. *Ning, F.* Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping of Inconel 718 Parts: A Feasibility Study / F. Ning, Y. Hu, Z. Liu [et all] // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 10. – Pp. 771–778. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/ j.promfg.2017.07.074

5. *Richter, B.* Influence of ultrasonic excitation on the melt pool and microstructure characteristics of Ti-6Al-4V at powder bed fusion additive manufacturing solidification velocities / B. Richter, S.J. Hocker, E.L. Frankforter // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 89. – P. 104228. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104228

6. *Diao, M.* Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment / M. Diao, C. Guo, Q. Sun // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 857. – P. 144044. https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144044

7. *Rosenthal, D.* The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments / D. Rosenthal // Trans. ASME. – 1946. – Vol. 68. – Pp. 849–866.

8. *Pavelic, V.* Experimental and computed temperature histories in Gas Tungsten Arc Welding of thin plates / V. Pavelic, R. Tanbakuchi, O.A. Uyehara, P.S. Myers // Weld. J. – 1969. Vol. – 48. – Pp. 295–305.

9. *Rochalski, D.* Welding heat source models in the analysis of temperature field /
D. Rochalski, D. Golanski, T. Chmielewski // Weld. Technol. Rev. – 2017. – Vol. 89. –
P. 5. https://doi.org/ 10.26628/WTR.V89I5.776

10. *Komanduri, R.* Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part II. Effect of Variation of Thermophysical Properties with Temperature / R. Komanduri, Z.B. Hou // Metall. Mater. Trans. – 2001. – Vol. 32. – Pp. 483–499. https://doi.org/10.1007/ s11663-001-0034-6

11. *Eagar, T.W.* Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources / T.W. Eagar, N.S. Tsai // Weld. J. – 1983. – Vol. 62. – Pp. 346–355.

Sajek, A. Application of FEM simulation method in area of the dynamics of cooling AHSS steel with a complex hybrid welding process / A. Sajek // Weld World 63.
 2019. – Pp. 1065–1073. https://doi.org/10.1007/s40194-019-00718-z

13. *Kik, T.* Numerical simulations of X22CrMoV12-1 steel multilayer welding /
T. Kik, J. Moravec, I. Novakova // Arch. Metall. Mater. – 2019. – Vol. 64. –
Pp. 1441–1448. https://doi.org/10.24425/amm.2019.130111

14. *Kik, T.* Application of numerical simulations on 10GN2MFA steel multilayer welding, dynamical systems in applications / T. Kik, J. Moravec, I. Novakova // Dynamical Systems Theory and Applications. – 2018. – Pp. 193–204. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016 11 201628

15. *Goldak, J.A.* A New Finite Element Model for Welding Heat Sources / J. Goldak, A. Chakravarti, A. Bibby // Metallurgical Transaction B. – 1984. – Vol. 15. – Pp. 299–305. https://doi.org/10.1007/BF02667333

16. *Farrokhi, F.* A numerical model for full and partial penetration hybrid laser welding of thick-section steels / F. Farrokhi, B. Endelt, M. Kristiansen // Opt. Laser Technol. – 2019. – Vol. 111. – Pp. 671–686. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.059

17. *Kik, T.* Computational Techniques in Numerical Simulations of Arc and Laser Welding Processes / T. Kik // Materials. – 2020. – Vol. 13 – Pp. 608. https://doi.org/10.3390/ma13030608 Kik, T. New method of processing heat treatment experiments with numerical simulation support. Modern technologies in industrial engineering V / T. Kik, J. Moravec,
 I. Novakova // Proceedings of the ModTech 2017 International Conference, Sibiu,
 Romania. – June 2017. – Pp 14–17. https://doi.org/10.1088/1757-899X/227/1/012069

19. Denga, D. Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements. /
D. Denga, W. Liang, H. Murakawa // J. Mater. Process. Technol. – 2007. – Vol. 183. –
Pp. 219–225. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.013

20. Welding Simulation User Guide, Sysweld Manual ESI Group. Available online: https://www.esigmbh.de/downloads/ESI/Dokumente/Welding/The_Welding_Si mulation Solution 210408 (доступ от 10 мая 2024)

21. *Kik, T.* Numerical simulations of laser and hybrid S700MC T-joint welding / T. Kik, J. Gorka // Materials – 2019 – Vol. 12. – P. 516. https://doi.org/10.3390/ ma12030516

22. *Zacharia, T.* Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 304 stainless steel, part II–experimental correlation / T. Zacharia, S.A. David, J.M. Vitek, T. Debroy // Welding Journal. – 1989. – Vol. 68. – Pp. 510–519.

23. *Heiple, C.R.* Effect of selenium on GTAW fusion zone geometry. Small additions of selenium to a stainless steel dramatically increase the depth/width ratio of GTA welds / C.R Heiple, J.R. Roper // Welding Journal. – 1981. – Vol. 60. – P. 143.

24. David, S.A. Current issues and problems in welding science / S.A. David,
T. Debroy // Science. - 1992. - Vol. 257. - No. 5069. - Pp. 497-502.

25. Semak, V.V. Melt pool dynamics during laser welding / V.V. Semak, J.A. Hopkins, M.H. Mccay, T.D. McCay // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1995. – Vol. 28. – No. 12. – Pp. 2443–2450.

26. Semak, V.V. On the possibility of microwelding with laser beams / V.V. Semak, G.A. Knorovsky, D.O. MacCallum // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2003. – Vol. 36. – No. 17. – P. 2170.

27. *Chang, C.E.* Inhomogeneities due to thermocapillary flow in floating zone melting / C.E. Chang, W.R. Wilcox// Journal of Crystal Growth. – 1975. – Vol. 28. – Issue 1. – Pp. 8–12. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/0022-0248(75)90019-6

28. *Eyer, A.* Crystal growth of silicon on Spacelab 1, Experiment ES-321 / A. Eyer, H. Leiste, and R. Nitsche // ESA European Symposium on Material Science Under Microgravity, Results of Spacelab 1, Schloss Elmau, 5–7 November 1984, ESA SP-222, 173.

29. *Keene, B.J.* A review of the surface tension of silicon and its binary alloys with reference to Marangoni flow / B.J. Keene, // In Surface and Interface Analysis – 1987. – Vol. 10. – Issue 8. – Pp. 367–383. Wiley. https://doi.org/10.1002/sia.740100802

30. *Mills, K.C.* Marangoni Effects in Welding / K.C. Mills, B.J. Keene, R.F. Brooks, A. Shirali // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1998. – No. 1739. – Pp. 911–25.

31. *Hibiya, T.* Surface Tension-Driven Flow of Molten Silicon: Its Instability and the Effect of Oxygen, Lecture Notes in Physics / T. Hibiya, T. Azami, M. Sumiji, S. Nakamura // Interfacial Fluid Dynamics in Physicochemical Phenomena ed. by R. Narayanan, D. Schwabe. – 2003. Vol. 628. – Pp. 131–155.

32. *Khamidullin, B.A.* Modeling of the effect of powder parameters on laser cladding using coaxial nozzle / B.A. Khamidullin, I.V. Tsivilskiy, A.I. Gorunov, A.Kh. Gilmutdinov // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 364. – Pp. 430–443. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.002

33. *McNallan, M.J., Debroy, T.* Effect of temperature and composition on surface tension in Fe-Ni-Cr alloys containing sulfur / M.J. McNallan, T. Debroy // Metall Trans B. – 1991. – Vol. 22. – Pp. 557–560. https://doi.org/10.1007/BF02654294

34. *Heiple C.R., Roper J.R.* Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry / C.R. Heiple, J.R. Roper // Weld – New York. – 1982. – Vol. 61.

35. *Takiuchi, N.* Effects of oxygen and temperature on the surface tension of liquid iron and its wettability of alumina / N. Takiuchi, T. Taniguchi, Y. Tanaka, [et all] // Nippon Kinzoku Gakkaishi. – 1991. – Vol. 55. – № 2. – Pp. 180-185.

36. *Keene, B.J.* Effect of Thermocapillary Flow on Weld-Pool Profile / B.J. Keene // Int. Mater. Rev. – 1988. – 33. – 1.

37. *Попель, С.И., Царевский, Б.В., Павлов, В.В.* Совместное влияние кислорода и серы на поверхностное натяжение железа / С.И. Попель, Б.В. Царевский, В.В. Павлов // Известия АН СССР. Металлы. – 1971. – № 4. – С. 54-58.

38. *Lu, S.* Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O2 and Ar–CO2 shielded GTA welding / S. Lu, H. Fujii, K. Nogi // Materials Science and Engineering: A – 2004. – Vol. 380. – Issue 1–2. – Pp. 290–297. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.05.057

39. *Hibiya, T.* Marangoni Flow and Surface Tension of High Temperature Melts
/ T. Hibiya, S. Ozawa // High-Temperature Measurements of Materials. – 2009. – Vol 11.
– Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85918-5

40. Абрамов, В.О. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В.О. Абрамов, О.В. Абрамов, В.В. Артемьев [и др.]; под общ. ред. О.В. Абрамова, В.М. Приходько. – М.: Янус-К, 2006. – 687 с.

41. *Ефимов, В.А., Эльдарханов А.С.* Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.

42. Эскин, Г.И. Обработка и контроль качества цветных металлов ультразвуком / Г.И. Эскин. – Москва: Металлургия, 1992. – 124 с.

43. *Вейко, В.П.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков и др.; под ред. В.И. Конова. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.

44. Gorunov, A.I. Additive manufacturing of Ti6Al4V parts using ultrasonic assisted direct energy deposition. In Journal of Manufacturing Processes / A.I. Gorunov.
2020. – Vol. 59. – Pp. 545–556. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.024

45. *Zhang, D.* Refining prior-β grains of Ti–6Al–4V alloy through yttrium addition / D. Zhang, D. Qiu, M. A. Gibson, Y. Zheng [et all] // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 841. – P. 155733. Elsevier BV. https://doi.org/ 10.1016/j.jallcom.2020.155733

46. *Tan, C.* Review on field assisted metal additive manufacturing / C. Tan, R. Li, J. Su [et all] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2023. – Vol. 189. – P. 104032. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2023.104032

47. Todaro, C.J. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing / C.J. Todaro, M.A. Easton, D. Qiu [et all] // Additive

Manufacturing. – 2021. – Vol. 37. – P. 101632. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/ j.addma.2020.101632

48. *Tilita, G.-A.* Influence of ultrasonic excitation on the mechanical characteristics of SLM 304L stainless steel / G.-A. Tilita, W. Chen, C.K.L. Leung [et all] // Procedia Engineering. 2017. – Vol. 216. – Pp. 18–27. Elsevier BV. https://doi.org/ 10.1016/j.proeng.2018.02.084

49. *Guo, A.* Acoustic field-assisted powder bed fusion of tungsten carbidereinforced 316L stainless steel composites / A. Guo, R. Tang, S. Guo [et all] // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – Pp. 5488–5502. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.271

50. Wang, T. In Situ Synchrotron X-Ray Diffraction Analysis of Ultrasonically Assisted Microstructure Refinement During Laser Melting Process / T. Wang,
B. Schneiderman, S.J. Clark [et all] // Elsevier BV. – 2023. https://doi.org/10.2139/ ssrn.4600373

51. *Yang, J.* Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat-affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy / J. Yang, S. Sun, M. Brandt, W. Yan // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210. – Issue 15. – Pp. 2215–2222. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.007

52. Sampath Kumar, K. Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor. / K. Sampath Kumar, V.S. Moholkar // Chemical Engineering Science. – 2007.
– Vol. 62. – Issue 10. – Pp. 2698–2711. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.02.010

53. *Hunt, J.D.* Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic. / J.D. Hunt // Materials Science and Engineering. – 1984. – Vol. 65. – Issue 1. – Pp. 75–83. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/0025-5416(84)90201-5

54. *Kobryn, P.A.* Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti–6Al–4V / P.A. Kobryn, S.L. Semiatin // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 135. – Issues 2–3. – Pp. 330–339. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00865-8

55. *Tourret, D.* Morphological stability of solid-liquid interfaces under additive manufacturing conditions / Tourret, D., Klemm-Toole, J., Castellanos, A.E. [et all] //

Acta Materialia. – 2023. – Vol. 250. – P. 118858. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/ j.actamat.2023.118858

56. *Ji*, *F*. Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing / F. Ji, X. Qin, Z. Hu // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 130. – P. 105789. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105789

57. *Liu, Z.* Numerical simulation and experimental analysis on the deformation and residual stress in trailing ultrasonic vibration assisted laser welding / Z. Liu, X. Jin, J. Li, [et all] // Advances in Engineering Software. – 2022. – Vol. 172. – P. 103200. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103200

58. *Ivanov, I.A.* Effect of laser-induced ultrasound treatment on material structure in laser surface treatment for selective laser melting applications / I.A. Ivanov, V.S. Dub, A.A. Karabutov // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Issue 1. Springer Science and Business Media LLC. https://doi.org/10.1038/s41598-021-02895-8

59. *Chen, J.J.J.* An extension of the Lockhart-Martinelli theory of two phase pressure drop and holdup / J.J.J. Chen, P.L. Spedding // International Journal of Multiphase Flow. – 1981. – Vol. 7. – Issue 6. – Pp. 659–675. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/0301-9322(81)90037-9

60. *Kolev, N.I.* Multiphase flow dynamics 1 / N.I. Kolev. – Springer International PU, 2016.

61. *Baker, J.L.L.* Flow-regime transitions at elevated pressures in vertical twophase flow / J.L.L. Baker // Office of Scientific and Technical Information (OSTI). – 1965 https://doi.org/10.2172/4533847

62. *Amaya, R.* Multiphase Flow Metering / R. Amaya, J. Lopez // Developments in Petroleum Science. – 2009. – Vol. 54. – Elsevier. – P. 67. doi:10.1016/s0376-7361(09)05413-2

63. *Sun, B*. Multiphase flow in oil and gas well drilling / B. Sun // John Wiley & Sons. 2016 ISBN 9781118720318. OCLC 945632599

64. *Zhang, H.-Q.* Review of High-Viscosity Oil Multiphase Pipe Flow / H.-Q. Zhang, C. Sarica, E. Pereyra // Energy and Fuels. – 2012. – Vol. 26. – Issue 7. – Pp. 3979–3985. American Chemical Society (ACS). https://doi.org/10.1021/ef300179s

65. *Crowe, C.T.* Multiphase Flow Handbook / C.T. Crowe, C.T. Crowe // CRC Press. – 2005. https://doi.org/10.1201/9781420040470

66. *Wörner, M.* A compact introduction to the numerical modeling of multiphase flows / M. Wörner // FZKA, 2003.

67. *Baojiang, S.* Multiphase flow in oil and gas well drilling / S. Baojiang // John Wiley & Sons. 2016. ISBN 9781118720318. OCLC 945632599.

68. *Cheng, L.* Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps: Fundamentals and Applications / L. Cheng, G. Ribatski, J.R. Thome // Applied Mechanics Reviews. – 2008. – 61(5).

69. Hoque, M.M. A critical analysis of turbulence modulation in particulate flow systems: a review of the experimental studies / M.M. Hoque, J.B. Joshi, G.M. Evans,
S. Mitra // Reviews in Chemical Engineering. - 2023. - Vol. 40. - Issue 4. - Pp. 511-544. Walter de Gruyter GmbH. https://doi.org/10.1515/revce-2022-0068

70. *Ohrdes, H.* Influence of the ultrasonic vibration amplitude on the melt pool dynamics and the weld shape of laser beam welded EN AW-6082 utilizing a new excitation system for laser beam welding / H. Ohrdes, S. Nothdurft, C. Nowroth [et all] // Production Engineering. – 2021. – Vol. 15. – Issue 2. – Pp. 151–160. Springer Science and Business Media LLC. https://doi.org/10.1007/s11740-020-01008-0

71. Brennen, C.E. Fundamentals of Multiphase Flows, Cambridge University Press, 2005. ISBN: 0521 848040.

72. Neglia, F., Sulpizio, R., Dioguardi, F., Sarocchi, D. Investigating the effect of polydispersity on the dynamics of multiphase flows using computational fluid dynamics tools / F. Neglia, R. Sulpizio, F. Dioguardi, D. Sarocchi // International Journal of Multiphase Flow. – 2023. – Vol. 168. – P. 104558. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104558

73. *Miller, C.T.* Multiphase flow and transport modeling in heterogeneous porous media: challenges and approaches / C.T. Miller, G. Christakos, P.T. Imhoff //

Advances in Water Resources. – 1998. – Vol. 21. – Issue 2. – Pp. 77–120. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/s0309-1708(96)00036-x

74. *Вейко, В.П.* Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» / В.П. Вейко, А.А. Петров, А.А. Самохвалов; под ред. В.П. Вейко: – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – 161 с.

75. *Zhao, J.* Experimental and numerical study on the effect of increasing frequency on the morphology and microstructure of aluminum alloy in laser wobbling welding. / J. Zhao, P. Jiang, S. Geng [et all] // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 21. – Pp. 267–282. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.008

76. Mohan, A.M. Effect of beam oscillation on the fluid flow during laser welding. / A. Mohan, D. Ceglarek, M. Auinger // Materials Today: Proceedings. – 2022.
– Vol. 59. – Pp. 1846–1851. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.435

77. *Le, T.-N.* Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on meltpool formation in transition mode of selective laser melting process / T.-N. Le, Y.-L. Lo // Materials & Design. – 2019. – Vol. 179. – P. 107866. https://doi.org/10.1016/ j.matdes.2019.107866

78. *Siao, Y.-H.* Examination of molten pool with Marangoni flow and evaporation effect by simulation and experiment in selective laser melting / Y.-H. Siao, C.-D. Wen // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 125. – P. 105325. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105325

79. *Sahu, A.K.* Probe Pulse Conditions and Solidification Parameters for the Dissimilar Welding of Inconel 718 and AISI 316L Stainless Steel / A.K. Sahu, S. Bag // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2020. – Vol. 51. – Issue 5. – Pp. 2192–2208. https://doi.org/10.1007/s11661-020-05705-4

80. Yilbas, B.S. Laser Welding of AISI 316 Steel: Microstructural and Stress
Analysis / B.S. Yilbas, S. Akhtar // Journal of Manufacturing Science and Engineering.
2013. – Vol. 135. – Issue 3. https://doi.org/10.1115/1.4024155

81. Depradeux, L. 2D and 3D Numerical Simulations of TIG Welding of a 316L Steel Sheet / L. Depradeux, J.-F. Jullien // Revue Européenne des Éléments Finis – 2004. – Vol. 13. – Issues 3–4. – Pp. 269–288. Informa UK Limited. https://doi.org/10.3166/reef.13.269-288

82. Xia, X. Numerical Simulation of 50 mm 316L Steel Joint of EBW and Its
Experimental Validation / X. Xia, J. Wu, Z. Liu // Metals. – 2020. – Vol. 12. – Issue 5.
– P. 725. https://doi.org/10.3390/met12050725

83. IAEA. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering:
 A Tutorial and Collection of Data – 2008 – Vienna

84. *Kumar, K.S.* Numerical modeling and simulation of a butt joint welding of AISI 316L stainless steels using a pulsed laser beam / K.S. Kumar // Materials Today: Proceedings, – 2005. – 2 (4–5). – Pp. 2256–2266. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.246

85. *Pichler, P.* Surface Tension and Thermal Conductivity of NIST SRM 1155a (AISI 316L Stainless Steel) / P. Pichler, T. Leitner, E. Kaschnitz [et all] // International Journal of Thermophysics. – 2022. – Vol. 43. – Issue 5. https://doi.org/10.1007/s10765-022-02991-5

86. *Gorunov, A.I.* Investigation of coatings of austenitic steels produced by supersonic laser deposition / A.I. Gorunov, A.Kh. Gilmutdinov // Optics & Laser Technology. – 2017. – Vol. 88. – Pp. 157–165. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.09.012

87. *Chimakurthi, S.K.* ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems / S.K. Chimakurthi, S. Reuss, M. Tooley, S. Scampoli // Engineering with Computers. – 2017. – Vol. 34. – Issue 2. – Pp. 385–411. Springer Science and Business Media LLC. https://doi.org/ 10.1007/s00366-017-0548-4

88. *Ji*, *F*. Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing / F. Ji,
X. Qin, Z. Hu [et all] // International Communications in Heat and Mass Transfer.
2022. – Vol. 130. – P. 105789. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105789

89. Никифоров, С.А. Численное моделирование и верификация точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L / С.А. Никифоров, И.В. Шварц,

А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – Вып. 8. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-8-2295

90. *Никифоров, С.А.* Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – Вып. 2. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2248

91. *Richter, B.* Influence of ultrasonic excitation on the melt pool and microstructure characteristics of Ti-6Al-4V at powder bed fusion additive manufacturing solidification velocities / B. Richter, S.J.A. Hocker, E.L. Frankforter // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 89. – P. 104228. Elsevier BV. https://doi.org/ 10.1016/j.addma.2024.104228

92. *Ning, F.* Ultrasonic vibration-assisted (UV-A) manufacturing processes: State of the art and future perspectives / F. Ning, W. Cong // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 51. – Pp. 174–190. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/ j.jmapro.2020.01.028

93. *Gilmutdinov, A.Kh.* Investigations of the sound frequency effect on laser acoustic welding of stainless steel / A. Kh. Gilmutdinov, A.I. Gorunov, O.A. Nyukhlaev, M. Schmidt // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – Issues 7–8. – Pp. 3033–3043. Springer Science and Business Media LLC. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04825-5

94. *Cong, W*. A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel / W. Cong, F. Ning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2017. – Vol. 121. – Pp. 61–69. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.008

95. *Wang, T.* Ultrasonic effects on gas tungsten arc based wire additive manufacturing of aluminum matrix nanocomposite / T. Wang, V. Mazanova, X. Liu // Materials and Design. – 2022. – Vol. 214. – P. 110393. Elsevier BV. https://doi.org/ 10.1016/j.matdes.2022.110393

96. Song, H. Effect of ultrasonic vibration on the microstructure and microhardness of laser cladding Fe-based crystalline/amorphous composite coatings /

H. Song, F. Jiang, C. Guo [et all] // Materials Letters. – 2023. – Vol. 335. – P. 133780. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133780

97. Osher, S. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations / S. Osher, J.A. Sethian // Journal of Computational Physics. – 1988. – Vol. 79. – № 1. – Pp. 12-49. https://doi.org/10.1016/ 0021-9991 (88)90002-2

98. *Hirt, C.W.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nichols // Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 39. – № 1. – Pp. 201-225. https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5

99. *Sethian, J.A.* Level set methods and fast marching methods / J.A. Sethian // Cambridge: Cambridge University Press. – 1999. – P. 404.

100. *Тонкое, Л.Е.* Численное моделирование динамики капли вязкой жидкости методом функции уровня / Л.Е. Тонкое // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2010. – Вып. 3. – С. 134-140.

101. *Ke, W.* Numerical study on multiphase evolution and molten pool dynamics of underwater wet laser welding in shallow water environment / W. Ke, Y. Liu, F.B. Teshome, Z. Zeng // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 220. – P. 124976. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124976

приложение
Основные переменные и вспомогательные функции

#include "udf.h"

// Scalars
const int UDS_VF2 = 0;
const int UDS_P = 1;

// Memory slots

const int UDM_VF2GradMag = 0; // secondary phase (metal) gradient magnitude const int UDM_FSMarker = 1; // free surface marker const int UDM_Qlas = 2; // laser const int UDM_Qrad = 3; // radiation heat loss const int UDM_Qconv = 4; // convection heat loss const int UDM_Q = 5; // const int UDM_Qpow = 6; // powder source const int UDM_Fpow = 7; // powder's force const int UDM_Smass = 8; // mass source const int UDM_srcPx = 9; // secondary phase (metal) gradient magnitude const int UDM_srcPy = 10; // secondary phase (metal) gradient magnitude //const int UDM_srcPz = 11; // secondary phase (metal) gradient magnitude

// laser heat source

const real laserPower = 2000; // [W] laser power const real r0 = 0.001; // [m] laser beam radius const real xc0 = 0.0015; // [m] beam center x-coordinate const real yc0 = 0.0; // [m] beam center y-coordinate const real zc0 = 0.002; // [m] beam center z-coordinate

//

const real Ts = 1649; // [K] solidus temperature const real Tl = 1673; // [K] liquidus temperature const real T0 = 300.0; // [K] refference temperature

//

const real emiss = 0.8; // [-] emissivity

const real hconv = 5; // $[W/m^2*K]$ convection coefficient

// constants

const real eps = 1e-19; // a small number to prevent division by zero const real sigmaStB = 5.67E-08; // [W/m^2*K^4] Stephan-Bolzmann constant const real brakeForceFactor = 1.0e12; // [1/s] no-flow factor (to stop the flow in air zone)

```
// Pressure
const real P = 0.0; // [Pa] pressure
const real dP = 500000000; // [Pa] pressure
const real wavelength = 0.0003; // [m]
const real friquency = 40000; // [Hz]
const real ultrasound_on = 1; // 0 - not work; 1 - work
```

```
// Math subroutines
real sign(double a)
{
    return ((a) >= 0.0) ? 1.0 : -1.0;
}
real abs_(double a)
{
    return (a)*sign(a);
}
real sq(real a)
{
    return (a) * (a);
}
```

Приложение 2

```
Исполняемый файл
```

```
#include "vars opt conv rad.h"
#include "sg.h"
#include "sg mphase.h"
#include "metric.h"
#include "math.h"
// global varsUtime
real current time = 0.0;
real exec time = -1.0;
DEFINE EXECUTE ON LOADING(on loading, libname)
{
     Set User Memory Name(0, "UDM-0-VF2GradMag");
     Set User Memory Name(1, "UDM-1-FreeSurfMarker");
     Set User Memory Name(2, "UDM-2-Qlas");
     Set User Memory Name(3, "UDM-3-Qrad");
     Set User Memory Name(4, "UDM-4-Qconv");
     Set User Memory Name(5, "UDM-5-Q");
     Set User Memory Name(6, "UDM-6-Qpow");
     Set User Memory Name(7, "UDM-7-Fpow");
     Set User Memory Name(8, "UDM-8-Smass");
     Set User Memory Name(9, "UDM-9-UDM srcPx");
     Set User Memory Name(10, "UDM-10-UDM srcPy");
     //Set User Memory Name(11, "UDM-11-UDM srcPz");
}
void uds derivatives(Domain* d, int n)
{
     MD Alloc Storage Vars(d, SV UDSI RG(n), SV UDSI G(n), SV NULL);
     Scalar Reconstruction(d, SV UDS I(n), -1, SV UDSI RG(n), NULL);
```

Scalar_Derivatives(d, SV_UDS_I(n), -1, SV_UDSI_G(n), SV_UDSI_RG(n), NULL); return;

}

DEFINE_ADJUST(adjust_gradient, d)

{

int secondary_phase_domain_index = 1; // metal (0 for gas)

real xyz[ND_ND], x1y1z1[ND_ND]; // position vectors
real x, y, z, x1, y1, z1;

real VF2, VF2_; real VF2GX, VF2GY, VF2GZ, VF2GMag, VF2GMax, interphase;

real dV, l, ds, Sm;

// heat sources
real Qlas; // laser heat source
real Qrad; // heat sink due to radiation
real Qconv; // heat sink due to convection
real Q;
real Qpow;
real Fpow, WeldSpeed;

real T, Tmaxcomputed, emissOfT;

real Qi; // laser power real eta; // laser energy efficiency real ksi; // proportioal factor of peak power density real ze; // coordinates upper surface real zb; real Ae; // constant real a; // scale factor real rz; real re; real rb,Tm; real vari1, vari2, vari3, numerator, Qa; // variables for support calculations

```
// Pressure variables
real srcPx, srcPy, srcPz;
real dPdx, dPdy, dPdz;
real rho; // density
int n;
Tmaxcomputed = 1.0;
VF2GMax = 1.0;
current time = CURRENT TIME;
if (exec time != current time)
ł
     // compute gradients of UDS before accessing the C UDSI G
     for (n = 0; n < N UDS; ++n)
     {
          uds derivatives(d, n);
     }
     // global maximum macro
     VF2GMax = PRF GRHIGH1(VF2GMax);
     Tmaxcomputed = PRF GRHIGH1(Tmaxcomputed);
     // collect data from all nodes and send it to the host process
     node to host real 2(VF2GMax,Tmaxcomputed);
     // print out calculated integrals
     #if RP HOST
          Message("Gradient = %e \ln", VF2GMax);
          Message("Temperature = %e [K] \n", Tmaxcomputed);
     #endif
```

thread loop c(t, d)

```
{
                 begin c loop(c, t)
                  {
                       C CENTROID(xyz, c, t);
                       x = xyz[0];
                       y = xyz[1];
                       //z = xyz[2];
                       //C UDSI(c,t,UDS P) = P + dP *
cos(2*M PI*(1/wavelength)*x) * cos(2*M PI*(1/wavelength)*y) *
cos(2*M PI*(1/wavelength)*z) * sin(2*M PI*friquency*CURRENT TIME);
                       C UDSI(c,t,UDS P) = P + dP *
cos(2*M PI*(1/wavelength)*x) * cos(2*M PI*(1/wavelength)*y) *
sin(2*M PI*friquency*CURRENT TIME);
                  }
                 end c loop(c, t)
                 begin c loop(c, t)
                  {
                       // density
                       rho = C R(c, t);
                       T = C T(c, t);
                       if (T > Tl \&\& ultrasound on == 1)
                        {
                             dPdx = C UDSI G(c, t, UDS P)[0];
                             dPdy = C UDSI G(c, t, UDS P)[1];
                        }
                       else
                        {
                             dPdx = 0.0;
                             dPdy = 0.0;
                        }
                       srcPx = -(dPdx / rho);
                       srcPy = -(dPdy / rho);
                       C UDMI(c, t, UDM srcPx) = srcPx;
```

114

```
C UDMI(c, t, UDM srcPy) = srcPy;
                  }
                  end_c_loop(c, t)
            } exec time = current time;
      }
}
/** Brake force X **/
DEFINE SOURCE(s bfx, c, t, dS, eqn)
{
      real src, T, Tm, vx0, VF2;
      real velocity muliplier;
      vx0 = 0;
      //VF2 = C UDSI(c, t, UDS VF2);
      T = C T(c, t);
     Tm = (Ts + Tl)/2;
      velocity_muliplier = (-1.0 * C_R(c, t) * brakeForceFactor) / (1 + exp((T - Tm) / 3));
      // compute momentum source term
      src = velocity muliplier * (-vx0 + C U(c, t));
            derivative of source term with respect to x-velocity C U
      //
      dS[eqn] = velocity muliplier;
      return src;
}
/** Brake force Y **/
DEFINE_SOURCE(s_bfy, c, t, dS, eqn)
{
      real src, T, Tm, vy0, VF2;
      real velocity muliplier;
      vy0 = 0.0;
      //VF2 = C UDSI(c, t, UDS VF2);
```

115

```
Tm = (Ts + Tl)/2;
      T = C T(c, t);
      velocity muliplier = (-1.0 * C R(c, t) * brakeForceFactor) / (1 + exp((T - Tm) / 3));
      // compute momentum source term
      src = velocity muliplier * (-vy0 + C V(c, t));
            derivative of source term with respect to y-velocity C V
      //
      dS[eqn] = velocity muliplier;
      return src;
}
/** Pressure force X **/
DEFINE SOURCE(s px, c, t, dS, eqn)
{
      real src;
      // compute momentum source term
      src = C UDMI(c, t, UDM srcPx);
      //
      dS[eqn] = 0.0;
      return src;
}
/** Pressure force Y **/
DEFINE SOURCE(s py, c, t, dS, eqn)
{
      real src;
      // compute momentum source term
      src = C UDMI(c, t, UDM srcPy);
      //
      dS[eqn] = 0.0;
      return src;
```

```
}
```

Приложение 3

Акт об использовании в учебном процессе результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ Проректор по образовательной деятельности КНИТУ-КАИ Моисеев Р.Е. 2025 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе результатов диссертационного исследования

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Никифорова Сергея Александровича «Трехмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава при лазерном нагреве в ультразвуковом поле» используют при чтении лекционных курсов, проведении практических занятий и лабораторных работ, выполнения выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров по направлению «Лазерная техника и лазерные технологии» на кафедре «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Заведующий кафедрой «Лазерных и аддитивных технологий», доктор физ.-мат. наук, профессор, академик АН РТ

А.Х. Гильмутдинов

Приложение 4

Акт апробации результатов

Федеральное государственное унитарное предприятие РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ»)

АКТ

27.02.2025

г. Саров

№ <u>195-96/56279</u>

УТВЕРЖДАЮ Заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ по приоритетному технологическому направлению, заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ ______Р.М. Шагалиев

апробации результатов диссертационной работы Никифорова Сергея Александровича, выполненной на тему: «Трехмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава при

лазерном нагреве в ультразвуковом поле»

Настоящим актом удостоверяется, что в ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» проведена апробация научно-технического исследования Никифорова С.А. - аспиранта Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ.

Исследования, проведенные в диссертационной работе, использовались в рамках проведения хоздоговорных работ по заказу АО ТВЭЛ. Результаты численных расчетов на базе представленной математической модели согласуются с экспериментальными данными и послужили основой для создания подмодулей программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер».

Начальник научно-исследовательского отдела

А.Н. Быков

Алексеева Татьяна Николаевна 8(83130) 2-83-80