

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Промышленная теплоэнергетика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

УДК 621.373.826-046.46:621.78-41

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	ПУРИН Михаил Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	С.В. Сыродой	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель Отделения социально- гуманитарных наук	Н.Г. Кузьмина			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Отделения контроля и диагностики	М.В. Василевский	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ/ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	А.М. Антонова	к.т.н., доцент		

Томск – 2018 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата, указанными в ФГОС ВПО по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Универсальные компетенции</i>
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать

	опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами на основе АСУТП; использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
	<i>Специальные профессиональные</i>
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Промышленная теплоэнергетика

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель профиля

Е.Е. Бульба

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Пурину Михаилу Владимировичу

Тема работы:

Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивного локального лазерного нагрева многослойной полиметаллической пластины

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10 июня 2018 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования – процессы тепломассопереноса при плавлении полиметаллической пластины.
Вид материала – металл.
Предмет исследования – моделирование процессов тепломассопереноса, протекающих совместно, в условиях лазерного плавления полиметаллической мишени

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитические обзор литературы, научных публикаций по направлению. 2. Физическая постановка. Формулирование математической модели на основе физической постановки 3. Результаты численного моделирования 4. Верификация программы 5. Проведение численных экспериментов 6. Заключение
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>18 слайдов</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент</p>	<p>Н.Г. Кузьмина, старший преподаватель Отделения социально-гуманитарных наук</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>М.В. Василевский, доцент Отделения контроля и диагностики</p>
<p></p>	<p></p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p></p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>10 декабря 2017 года</p>
--	------------------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Старший преподаватель НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ</p>	<p>С.В. Сыродой</p>	<p>к.т.н.</p>		<p>10.12.17</p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5Б4Б</p>	<p>Пурин Михаил Владимирович</p>		<p>10.12.17</p>

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 83 с., 14 рис., 5 табл., 77 источников.

Ключевые слова: теплоперенос, плавление металлов, лазерное излучение, испарение, теплопроводность, численное моделирование

Объектом исследования является процессы теплопереноса, протекающих совместно при плавлении полиметаллических структур под воздействием высокоинтенсивного квантового потока (лазера)

Цель работы – Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивного локального лазерного нагрева многослойной полиметаллической пластины

В процессе исследования проводились численные эксперименты по плавлению полиметаллической пластины, выполненной из различных металлов и при варьировании мощности лазерного излучения

В результате исследования изучены процессы теплопереноса, протекающие в полиметаллической пластине при плавлении ее лазером

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс

Область применения: металлообработка, автомобильная промышленность, точное машино- и приборостроение, ювелирное производство

Экономическая эффективность/значимость работы повышение экономичности процессов металлообработки вследствие улучшения технологии подготовки поверхностей металлических заготовок путем применения лазерного излучения

В будущем планируется продолжение изучения процессов, протекающих при лазерной обработке металлов, усовершенствование математической модели с целью учета большего количества влияющих факторов

Обозначения и сокращения

Латинские:

a, b – коэффициенты, зависящие от значений J_1 ;

c – теплоемкость, Дж/(кг·К);

$E_{isl} = I/I^*$ – безразмерная интенсивность излучения;

h – высота пластины, м;

hd – фронт размазывания, м;

I – интенсивность излучения, Вт/м²;

J – энергия ионизации атома, эВ;

k – постоянная Больцмана;

$k_{отр}$ – коэффициент отражения паров металла;

l – длина пластины, м;

M – молярная масса, кг/кмоль;

n – показатель температурной зависимости $D_{12} \sim T^n$;

Q – теплота процесса, кДж/кг;

$Q_{12}^{(1,1)}$ – приведенный интеграл взаимодействия молекул первого и второго компонента;

T – температура, К;

\dot{S} – дифференциальная координата плавления;

W – скорость, кг/(м²·с);

x, y – размерные координаты по пространству.

Греческие:

α – коэффициент поляризуемости газа;

δ – дельта-функция Дирака;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

ξ – координата плавления, м;

ρ – плотность, кг/м³;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – постоянная Стефана-Больцмана;

ζ – массовая концентрация паров металла в газе, кг/кг;

χ – коэффициент поглощения среды, м⁻¹;

Ψ – функция Хэвисайда;

P - давление, Па;

Ω – направление луча;

Безразмерные:

$C = c/c^*$ – безразмерная теплоемкость;

$P = \rho/\rho^*$ – безразмерная плотность;

$\Lambda = \lambda/\lambda^*$ – безразмерная теплопроводность;

$X = x/l$ – безразмерная координата по пространству;

$Y = y/l$ – безразмерная координата по пространству;

$\theta = T/T^*$ – безразмерная температура;

$Fo = \lambda \cdot ht / (c \cdot \rho \cdot l^2)$ – число Фурье;

$Fod = t \cdot D_{12} / l^2$ – диффузионное число Фурье;

$Pom = Q_{melt} \cdot \rho \cdot \dot{S} \cdot \delta \cdot l^2 / (h \cdot \lambda^* \cdot T^*)$ – критерий Померанцева;

$PomI = I^* \cdot l / (\lambda^* \cdot T^*)$ – критерий Померанцева для уравнения энергии

в газовой области;

$Ki_{EV} = W_{EV} \cdot Q_{EV} / (T^* \cdot \lambda^*)$ – критерий Кирпичева, описывающий тепловой эффект испарения;

$Ki_L = I^* \cdot l \cdot (1 - k_{отр}) / (T^* \cdot \lambda^*)$ – критерий Кирпичева, описывающий тепловой эффект плавления;

$Bi = \alpha \cdot l / \lambda_0$ – число Био.

Надстрочные:

* – обозначение масштаба.

Подстрочные:

1 – верхняя пластина;

2 – нижняя пластина;

3 – газовая область;

melt – процесс плавления;

ev – процесс испарения;

e – окружающая среда;

0 – начало процесса;

ж – жидкая фаза;

тв – твердая фаза.

Оглавление

Введение	10
1. Обзор литературы	12
1.1 Состояние и развитие лазерной техники	12
1.2 Современное состояние проблемы математического описания процессов плавления лазерным излучением полиметаллических мишеней	17
2. Постановка задачи	25
2.1 Физическая постановка задачи	25
2.2 Математическая постановка задачи	26
2.3 Тестовые задачи	34
3. Результаты математического моделирования	39
3.1 Влияние мощности лазера на характеристики плавления	39
3.2 Влияние металлов на характеристики плавления	44
3.3 Влияние оттока теплоты на процесс плавления	49
3.4 Эффект оптического пробоя при различных мощностях лазера	53
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	57
5. Социальная ответственность	63
Заключение	73
Список публикаций студента	75
Список используемых источников	77

Введение

В выпускной квалификационной работе приведены результаты математического моделирования задачи исследования процессов тепло- и массопереноса при воздействии лазерным излучением на полиметаллическую пластину. Лазерная обработка металлов является актуальной и востребованной в промышленности благодаря своим преимуществам, таким, как высокая точность обработки, отсутствие повреждений на обрабатываемой поверхности и другим. Воздействие на металлы лазером связано с процессами плавления, испарения и кристаллизации, исследование которых на практике сложно и влечет за собой значительные финансовые затраты. В этих условиях оптимальным является использование аппарата математического моделирования, который позволяет проводить численные исследования без дорогостоящих натурных экспериментов.

Значительный вклад в создание математических моделей процессов тепло- и массопереноса внесли ученые А. А. Самарский, В. И. Мажукин, О. Н. Королева, в работах которых рассматриваются различные способы описания данных процессов. Однако существующие на сегодняшний день математические модели сложны и, соответственно, малоприменимы для решения практических задач, тогда как алгоритм, предложенный в данной работе, относительно прост в применении и не требует значительных затрат машинных мощностей для своего выполнения. Исходя из этого, цель данной работы - математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивного локального лазерного нагрева полиметаллической пластины.

Объектом исследования данной работы являются процессы тепло- и массопереноса, протекающие при плавлении полиметаллической пластины лазерным излучением. Выбор объекта и предмета исследования обусловлен значительной сложностью математического описания процессов, протекающих при лазерной обработке металлов в высокоточных отраслях

промышленности. В таких отраслях воздействию лазерного излучения подвергаются детали из дорогостоящих металлов, любое отклонение в технологии обработки которых ведет к браку.

Предметом исследования являются температурные поля в полиметаллической пластине при ее обработке лазером.

Результаты выполнения работы могут быть использованы в металлообрабатывающей промышленности для уточнения оптимальных режимов обработки изделий.

Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, представлены на следующих конференциях: международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (26-28 апреля 2017 г.) и «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (24-26 апреля 2018 г.) на базе Томского политехнического университета.

1 Обзор литературы

1.1 Состояние и развитие лазерной техники

Основой для создания лазеров является предложенная Альбертом Эйнштейном в 1916 г. теория поглощения и испускания света атомами. В 1954 г. в Физическом институте Академии наук СССР под руководством Н. Г. Басова и А. М. Прохорова и в Колумбийском университете в США под руководством Ч. Таунса было создано устройство, названное «мазер», излучавшее микроволны. Начиная с 1961 г. разные типы лазеров стали все активнее применяться сперва в оптических лабораториях для фундаментальных и прикладных исследований, а затем и в промышленности [1,2].

Лазерная техника интенсивно развивается. Применение лазеров в операциях обработки материалов повышает производительность труда, улучшает качество выпускаемой продукции, продлевает ресурс изделия, позволяет полностью автоматизировать процесс производства. Результатом внедрения лазерных технологий является экономия материальных и энергоресурсов. Актуальным становится применение лазеров в полиграфии, химической промышленности, медицине, информационной технике, промышленном контроле [3-5].

Активное внедрение лазерных технологий обусловлено их экономической эффективностью и высокой фондоотдачей от внедрения. Затраты на внедрение подобного оборудования окупаются за срок не более одного года [6]. Такие физические особенности лазерного излучения как возможность достижения высоких интенсивностей излучения, высокая степень монохроматичности и когерентности обусловили его применение во многих технологических процессах тепловой и селективной обработки веществ и материалов.

Высокая степень когерентности лазерного излучения позволяет фокусировать его в пятно диаметром в несколько длин волн. Разработка

лазеров мощностью непрерывного излучения в несколько киловатт и пиковой мощностью излучения в сотни мегаватт позволяет достичь при фокусировке этого излучения интенсивностей до 10^8 Вт/см² в непрерывном режиме и до 10^{12} Вт/см² в импульсном режиме [5,6]. Лазерное излучение интенсивностью $10^4 \div 10^7$ Вт/см² используется при термической обработке металлов – сварке, резке, наплавке, а также в медицине. Высокая монохроматичность лазерного излучения в сочетании со значительной интенсивностью при кратковременности импульса излучения ($10^{-14} \div 10^{-7}$ с) позволяет использовать его в селективной (атомно-молекулярной) технологии (лазерной химии, биологии, медицине и др.) [6].

Эффективность лазерного воздействия заключается в следующем – при воздействии лазерного излучения на поверхность заготовки происходит переход электромагнитной энергии волны в тепловую энергию электронов решетки в тонком скин-слое глубиной 10^{-6} см за время 10^{-11} с. При взаимодействии лазерного излучения с диэлектриками, непрозрачными для него, глубина поглощения тоже достаточно мала и может составлять $10^{-1} \div 10^{-4}$ см [7].

Данная особенность лазерного луча как источника поверхностного тепла при обработке металлов обеспечивает следующие преимущества: локальность воздействия, определяющая отсутствие деформаций изделия после лазерной обработки; исключение доводочных операций; высокий КПД использования энергии излучения; быстрота переходов между фазовыми состояниями металла, что обуславливает повышенную износостойкость и коррозионную стойкость обработанных изделий [2]. Такие преимущества, как высокая производительность процесса обработки, возможность обработки любых материалов – хрупких, тугоплавких, химически активных и прочих, возможность хорошей фокусировки, обусловлены когерентностью лазерного излучения, возможностью быстрого перемещения пучка и изменения его мощности [6].

Стоит отметить, что при лазерной обработке материалов исчезает необходимость вакуумировать образец, так как в данном случае отсутствует рентгеновское излучение от образца, как это бывает при обработке электронным пучком. Использование лазерных технологий при изготовлении микроэлектронных плёночных систем значительно сокращает число технологических этапов изготовления изделия, снизить процент брака, повысить производительность процесса [5,6].

Ежегодно растёт сфера применения лазеров, увеличивается число разрабатываемых промышленных и экспериментальных лазеров, обладающих различными длинами волн, разными уровнями мощности и временными режимами работы.

На сегодняшний день в промышленности применяются лазеры различных типов: газовые, диодные, волоконные, лазеры на основе кристаллов.

На современном этапе развития техники и технологии наиболее совершенными в практическом отношении являются газовые CO_2 -лазеры, в которых возбуждение электронов осуществляется за счет электрического воздействия. С момента их создания мощность этих лазеров непрерывно увеличивалась и на данный момент существуют промышленные лазерные установки мощностью до нескольких десятков кВт [8]. Такие лазеры используют для резки металлов, пластмассы, древесины и др., а также для сварочных работ, сверления отверстий и упрочнения материалов. CO_2 -лазеры характеризуются хорошей обработанностью конструкции, высокими значениями полной энергетической эффективности (до 10%), хорошим оптическим качеством пучка, надёжностью в эксплуатации [9,10]. На рисунке 1 изображен процесс лазерной резки трубы из нержавеющей стали.



Рисунок 1 – Выкопировка из [11]. Процесс лазерной резки трубы из нержавеющей стали

На рисунке 2 представлен процесс нанесения материала при помощи лазерного луча – лазерная наплавка.

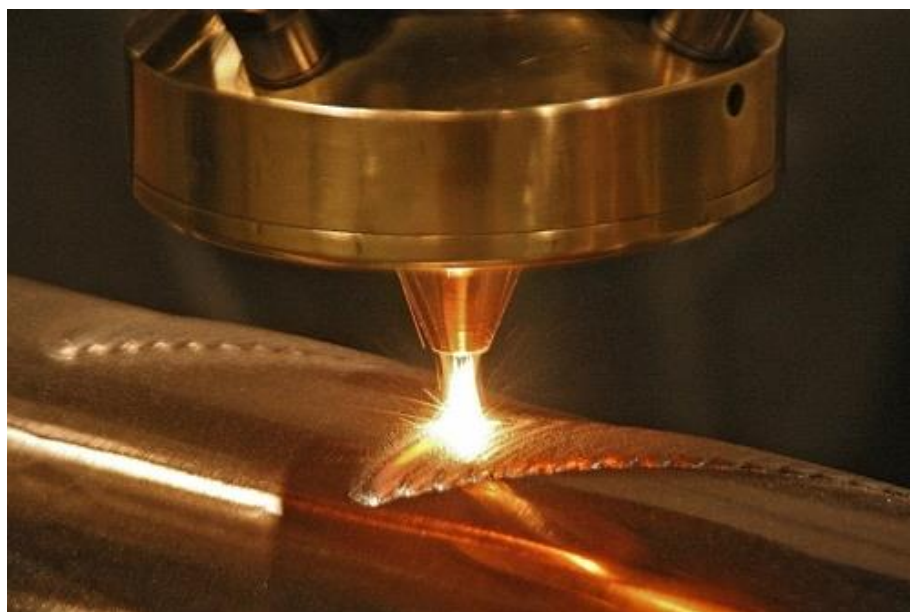


Рисунок 2 – Выкопировка из [12]. Процесс лазерной наплавки

Полупроводниковые лазеры отличаются высокой эффективностью работы. Они имеют высокий КПД (до 70%), обусловленный высокой эффективностью преобразования подводимой электрической энергии в лазерное излучение; широкий диапазон длин волн генерации от 0,3 до 30 мкм, обусловленный шириной запрещенной зоны полупроводникового материала;

простую конструкцию, связанную с возможностью накачкой постоянным током [13,14].

Твердотельные лазеры имеют такие достоинства, как компактность, надежность, высокая эффективность применения. Применяются в том числе в металлообработке [13,15].

Гелий-неоновые лазеры применяются в медицине и промышленном контроле, их особенностью является высокая стабильность и монохромность излучения, высокий ресурс работы [6,13].

Ионные лазеры применяются в микротехнологиях, научных исследованиях и медицине [16].

Лазеры на парах металлов применяют, в основном, в медицине [6,17].

Эксимерные лазеры, отличающиеся своим коротковолнистым излучением и хорошей энергетической эффективностью, применяют в микротехнологии [5,6].

Перспективными являются лазеры на крестителях, обладающие свойством широкой перестраиваемости длины волны излучения в видимой области спектра и широко применяющиеся в медицине и научных исследованиях [6,18].

1.2 Современное состояние проблемы математического описания процессов плавления лазерным излучением полиметаллических мишеней

Лазерная обработка металлов приобретает все большее значение во многих отраслях промышленности. Высокие плотности энергии лазерного излучения, значительно превосходящие большинство других источников энергии, дают возможность получать качественно новые результаты, невозможные при использовании традиционных методов обработки.

Главными преимуществами лазерной технологии в металлообработке являются отсутствие механических повреждений на обрабатываемом изделии, высокая точность, возможность работать со сложными геометрическими формами [19].

Благодаря высокой точности проводимых операций значительно сокращается время на рихтовку и зачистку изделий после обработки, например, при использовании традиционной сварки это время составляет до 35% общего технологического времени. Отпадает необходимость в дорогостоящей финишной обработке изделий [20].

Технология лазерной обработки материалов неразрывно связана с процессами плавления и испарения. С точки зрения математики данная технология относится к классу нелинейных задач математической физики со значительно различающимися теплофизическими характеристиками жидкой и твердой фаз. Протекающие процессы нагрева, плавления и испарения образцов описываются в рамках многофронтной классической задачи Стефана [21].

Теория процессов теплопереноса при наличии подвижных границ фазовых превращений (проблема Стефана) все еще остается трудной и малоразобранной областью научного знания. Успехи в исследовании данной проблемы очень важны для самых разных технических приложений.

Так в металлургии основными процессами в технологической цепи подготовки готового изделия являются процессы плавления и кристаллизации. Оптимальное управление режимами мартеновской или конвекторной плавки,

а также формирование качественной структуры кристаллизирующегося слитка в изложнице или установке непрерывной разливки стали всецело зависит от уровня решения данного класса задач [22].

Исследование динамики фазовых переходов I рода в ряде случаев представляет собой весьма сложную задачу. Переход из одного фазового состояния в другое в общем случае является неравновесным процессом, требующим для своего описания явного учета кинетики фазового превращения [23].

Наиболее заметно эта специфика фазовых превращений проявляется при импульсном воздействии концентрированных потоков энергии на конденсированную фазу. Исследование процессов термического воздействия лазерных импульсов нано- и пико секундной длительности на металлы и полупроводники [24], связанные в частности с проблемой получения аморфных материалов, показало, что динамика фазового перехода обязательно сопровождается появлением метастабильной фазы, т.е. явлениями перегрева твердой фазы и переохлаждением жидкой. В подобных процессах, как отмечалась в [25], фактор неравновесности играет определяющую роль. Впервые задача о изменении фазового состояния была сформулирована еще в прошлом веке [26]. С тех пор появилось целое семейство математических моделей в тех или иных приближениях, описывающих проблему фазовых превращений [26-29]. Наиболее распространенным приближением является так называемый классический вариант задачи Стефана, в котором процессы описываются уравнением теплопроводности вместо полной системы уравнений гидродинамики. Другим существенным упрощением в задачах Стефана является предположение постоянства температур фазового перехода. Тем самым из рассмотрения исключается кинетика фазового перехода и связанные с нею возможности перегрева или переохлаждения исходного состояния вещества. Помимо проблем лазерного воздействия существует еще ряд задач, в которых кинетика перехода играет существенную роль [30]. В этих случаях в математической

модели на границе раздела фаз вместо постоянства температуры должно выписываться кинетическое условие [31], в явном виде учитывающее неравновесность фазового перехода. Выбор математической модели и алгоритма численного решения задач Стефана определяется типом задачи, целью научного исследования, затратами на вычисления и требуемой степенью точности решения. Решение классического варианта задачи Стефана состоит в определении тепловых полей и границы фазового перехода.

Классическая задача Стефана описывается в ряде источников [21,27,28]. Основная трудность при решении задачи заключается в том, что при вычислении температуры подвижные границы раздела фаз образуют переменные области, а положение этих границ заранее неизвестно и также должно вычисляться в ходе решения задачи.

В настоящее время теория решения задач со свободной границей, особенно многомерных, переживает период бурного развития, что во многом определилось созданием аппарата вариационных неравенств. Идея, получившая развитие в работах Фикеры, Лионса, Стампаккья, Киндерлера и др., заключалась в использовании специальных обобщенных постановок задач со свободной границей, не содержащих свободную границу в явном виде. Впервые такой подход был применен в работах О. А. Олейник [32,33] и С. А. Каменомостской [34] к исследованию задач Стефана.

Для многомерной задачи Стефана долгое время единственным результатом оставались теоремы существования обобщенного решения О. А. Олейник и С. А. Каменомостской, полученные в 1960 г.

Методы решения задачи Стефана разделяются на аналитические и численные. Аналитические методы основаны на нахождении решения задачи в замкнутой аналитической форме и применимы лишь к ограниченному количеству случаев, когда рассматривается упрощенная постановка задачи [21].

Широкое распространение получают приближенные аналитические методы. Согласно [35], к этим методам относятся такие методы, как метод

последовательной смены стационарных состояний [36], методы, представляющие конечное решение в виде степенных рядов [37-39], методы, основанные на сведении к системе обыкновенных дифференциальных уравнений [32,33], методы редукции при помощи теории потенциала к интегральным уравнениям [40], интегральный метод [41-43], метод малого параметра [44] и др. В работах [45-47] используется вариационный метод Био [48], который основан на введении термодинамического эквивалента функции Лагранжа в механике и связанный с понятием термического слоя. Профиль температуры при этом аппроксимирован степенной функцией.

Большинство численных методов решения задачи Стефана разделяются на две группы: методы, основанные на явном выделении фронта плавления [49] и методы сквозного счета [50].

К методам явного выделения фронта плавления можно отнести методы, основанные на отслеживании свободной границы на каждом временном слое. Наиболее часто для этих целей применяют численные методы, в которых свободная граница задается расположением соответствующих узлов сетки. Это возможно путем введения новых динамических независимых переменных или же согласованных динамических сеток в исходных переменных [21].

Согласно [21,51], к таким методам относятся методы с выпрямлением фронта, в которых применяется динамическая сетка постоянной структуры с узлами, закрепленными на границе раздела фаз. Стоит отметить, что в одномерных задачах адаптация к границе раздела фаз может осуществляться и за счет применения при решении переменного шага по времени, либо по пространству. Использование переменного шага по времени широко применяется при решении одномерных задач Стефана, тогда как использование переменного шага по пространству плохо приспособлены к решению многомерных задач [21].

Применение методов явного выделения фронта плавления для решения многомерных задач сопряжено со значительными алгебраическими трудностями и значительными вычислительными затратами [51]. Численные

алгоритмы, основанные на явном выделении фронта плавления, отличаются достаточно высокой точностью выявления межфазной границы, но, однако, весьма громоздки, при этом для вычисления результатов требуют больших затрат машинного времени.

Для математического моделирования определенного класса задач с фазовыми превращениями, в которых точное положение границы раздела фаз и кинетика перехода не играют существенной роли, высокую эффективность и иные методы [52]. Идея таких методов заключается в отказе от прямого нахождения неизвестной фазовой границы и замене его процедурой сглаживания функции теплосодержания. Использование процедуры сглаживания дает возможность находить обобщенное решение задачи Стефана с помощью экономичного алгоритма сквозного счета [53,54], который особенно эффективен при решении задач в многомерных постановках.

Стоит отметить, что данные методы весьма чувствительны к выбору параметра сглаживания [55], определение значения которого в ряде случаев весьма достаточно сложно. Также методы сквозного счета имеют сравнительно низкую точность определения положения фазовой границы, что бывает важным в ряде приложений. Кроме того, введение процедуры сглаживания полностью исключает кинетику фазовых превращений в неклассических постановках проблемы Стефана. Реализация принципа однородной записи в этих случаях может быть вообще не осуществима. В связи с этим весьма актуальной представляется проблема разработки экономичных и более совершенных алгоритмов численного решения задачи с явным выделением фазовой границы. Несомненный интерес могут представлять методы решения задачи Стефана на адаптивных сетках, динамически связанных с решением [23].

Экономичная схема сквозного счета для решения многомерной задачи Стефана предложена А. А. Самарским и Б. Д. Моисеенко [53]. Особенность данной схемы заключается в том, что отсутствует явное выделение границы

раздела фаз и вычисление ведется по одномерным разностным схемам. Расчет основывается на принципе «размазывания» теплоемкости по температуре.

Для решения многомерного квазилинейного уравнения теплопроводности с размазанными коэффициентами теплоемкости и теплопроводности используется, согласно [53], локально-одномерный метод, введенный и обоснованный в [56,57]. Его принцип заключается в последовательном решении по разным пространственным переменным одномерных уравнений теплопроводности с использованием безусловно устойчивых неявных схем. Метод пригоден для произвольных областей в случае краевых условий I рода, а в случае краевых условий III рода – для областей специального вида [56].

В работе [58] многомерная задача Стефана с фиксированной температурой фазового перехода приводится к задаче теплопроводности с источником тепла, распределенным в малой окрестности границы раздела фаз, при этом данная окрестность выбирается в области образующейся фазы. Вследствие постоянного изменения положения поверхности фазового перехода вводимый источник тепла движется вместе с границей раздела фаз.

Существующие математические модели достаточно сложны в использовании и для решения практических задач.

В работах О. Н. Королевой [59] рассматриваются двумерные многофронтные задачи Стефана применительно к решению задач о быстрых фазовых переходах в многослойных материалах. Автор предлагает новые алгоритмы построения расчетных сеток для областей со сложной геометрией до начала вычислений и решения многофронтных одномерных и двумерных задач Стефана. В своей работе О. Н. Королева рассматривает плавление и испарение двухмерной мишени произвольной геометрии при разлитых режимах воздействия. Для численного решения использовался метод перехода к произвольной нестационарной системе координат, принадлежащей некоторому расчетному пространству. Для определения неизвестных координат узлов сетки применялось уравнение обратного преобразования,

которое является дифференциальным уравнением в частных производных. Уравнение преобразования составлялось так, чтобы сохранялась зависимость скорости движения узлов от динамики решения уравнений, описывающих протекающие физические процессы. Движение адаптирующейся сетки выполняется при помощи функции преобразования, имеющей смысл потока вещества. Эта функция связана с искомым решением. С целью компенсировать неполную согласованность искомого решения с механизмом перестройки сетки в функцию преобразования вводят подгоночные коэффициенты, подбор которых позволяет уменьшить степень несогласованности. Однако стоит учесть, что наличие подгоночных коэффициентов в методе адаптации является свидетельством его несовершенства.

Переход к двумерным областям знаменует возрастанием сложности построения расчетных сеток. Генерация сеток в произвольных областях даже с фиксированными узлами является сложной задачей. Основные затруднения связаны со сложной геометрией физической области. Также трудность вызывает и особенность ряда задач, рассматривающих воздействие концентрированных потоков энергии на материалы, которая заключается в том, что размеры области, в которой выделяется энергия излучения, определяются размерами пятна фокусировки и могут быть значительно меньше рассматриваемой области. Затем происходит распределение выделившейся энергии по всей области. Как следствие, для подобных расчетов необходимы сетки с мелкими ячейками в области выделения энергии, сопровождающейся большими градиентами температуры и крупными ячейками в области медленного изменения решения.

Проблема лазерного пробоя при плавлении металлов рассмотрена в [60]. Авторы изучают оптический пробой пара алюминия в зависимости от интенсивности лазерного излучения. Была разработана математическая модель, описывающая кинетику неравновесной ионизации атомов и ионов металлов лазерным излучением. В модели учитывались столкновительные

реакции: спонтанный распад возбужденных состояний, электронное возбуждение и девозбуждение, каскадная ионизация и рекомбинация, а также фотопроцессы: фотовозбуждение и девозбуждение, фотоионизацию и фоторекомбинацию в поле лазера и континуального излучения. Это позволяет использовать рассматриваемую модель для исследования оптического пробоя паров металлов в широком спектральном диапазоне воздействующего излучения.

В работе рассматривалась только начальная стадия зарождения плазмы – оптический пробой в металлическом паре (алюминия) в широком диапазоне волн.

Полное описание всех стадий развития лазерной плазмы можно выполнить в рамках неравновесной радиационной газовой динамики, включающей в рассмотрение процессы микро- и макроуровня. Математическую основу неравновесной радиационной газовой динамики составляют несколько математических блоков, основными из которых являются нелинейные системы уравнений столкновительно – радиационной кинетики, радиационного переноса в линейчатом и непрерывном спектрах, баланса энергии и газовой динамики. Основным затруднением в развитии неравновесной радиационной газовой динамики является отсутствие кинетических столкновительно-радиационных моделей, пригодных для описания неравновесных явлений микроуровня в широком частотном диапазоне.

С другой стороны, для описания кинетики оптического пробоя в ряде случаев достаточно использования соответствующей столкновительно-радиационной модели, дополненной уравнениями баланса энергии. Развитие макропроцессов, связанных с переносом излучения и вещества пара, начинаются значительно позже, когда система начинает приближаться к локально-термодинамическому равновесию и, на первой стадии пробоя, ими можно пренебречь. Тем самым математическая формулировка задачи становится проще, а пороговые условия плазмообразования и его характерное

время, столь необходимые для практических целей, можно определить с достаточной степенью точности.

2 Постановка задачи

2.1 Физическая постановка задачи

В начальный момент времени ($t=0$) в ограниченную область диметаллической мишени падает лазерный луч, в результате температура обоих слоев металла повышается. При достижении температур фазовых переходов инициируется процесс плавления металлов, в результате образуется гетерогенная структура, состоящая из жидкой и твердой фаз металлов с различающимися теплофизическими характеристиками. При продолжающемся нагреве инициируется процесс испарения металла в газовую область. Пары металла формируют во внешней среде парогазовую смесь, оказывающую существенное влияние на характеристики переноса излучения.

При решении задачи принималось, что теплофизические характеристики металлов зависят от положения фронта плавления. Теплофизические характеристики металлов и газа, теплоты плавления и испарения металлов приведены в таблице 1. Лазерный луч направлен перпендикулярно поверхности мишени.

Таблица 1 – Основные физические характеристики в системе «Диметаллическая пластина-газ»

Теплофизические характеристики металлов							
	Твердая фаза			Жидкая фаза			
	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	
Алюминий	951,3	240	2712	1090	90,7	2368	[61]
Медь	385	380	8933	545	165,6	8000	[61]
Свинец	127,5	32,9	11340	148	15,12	10592	[61]
Теплофизические характеристики газа							
	c , Дж/(кг·К)		λ , Вт/(м·К)		ρ , кг/м ³		
Аргон	519		0,0394		1,661		[62]
Теплота плавления, теплота испарения и температура плавления металлов							
	Q_{melt} , кДж/кг		Q_{ev} , кДж/кг		T_{melt} , К		
Алюминий	393		10900		933,3		[61]
Медь	213		4800		1356		[61]
Свинец	24,3		860		600,4		[61]

2.2 Математическая постановка задачи

Математическая модель рассматриваемого процесса состоит из уравнений энергии для металлов и газовой области, уравнения диффузии, уравнения переноса излучения и соответствующих начальных и граничных условий с учетом зависимости теплофизических характеристик от температуры (1)-(28):

Уравнение энергии для верхней пластины:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{Q_{\text{melt1}} \cdot \rho_1}{h_d} \cdot \dot{S} \cdot \delta, \quad (1)$$

$$\dot{S} = \frac{d\xi}{dt}.$$

Уравнение энергии для нижней пластины:

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{Q_{\text{melt2}} \cdot \rho_2}{h_d} \cdot \dot{S} \cdot \delta. \quad (2)$$

Уравнение энергии для газовой области:

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \text{div}(I), \quad (3)$$

Уравнение диффузии в газовой области:

$$\rho_3 \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \rho_3 \cdot D_{13} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

где c – теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

T – температура, К;

x, y – размерные координаты по пространству, м;

t – координата по времени, с;

I – интенсивность излучения, Вт/м²;

ζ – массовая концентрация паров металла в газе, кг/кг;

D_{13} – коэффициент диффузии, м²/с;

\dot{S} – дифференциальные координаты фронта плавления по времени;

ξ – координата плавления.

Коэффициент диффузии определялся согласно [63]:

$$D_{13} = 2,66 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{T^3 \cdot (M_1 + M_3) / (2 \cdot M_1 \cdot M_3)}}{P \cdot Q_{13}^2 \cdot \Omega^{(1,1)*}(T^*)}, \frac{m^2}{c}, \quad (5)$$

где Q_{13} – параметр функции, выражающий потенциальную энергию взаимодействия молекул металла и газа [63];

$Q_{13}^{(1,1)} = \Omega^{(1,1)*}(T^*)$ – приведенный интеграл взаимодействия молекул металла и газа;

M – молярная масса, кг/кмоль;

P – давление, Па.

Приведенный интеграл взаимодействия молекул первого и второго компонента [63]:

$$Q_{13}^{(1,1)} \cdot \left(\frac{k \cdot T}{J_3} \right)^m \cdot \alpha_3^{-\frac{2}{3}} = a \cdot \exp \left(b \cdot \frac{J_3}{J_1} \right), \quad (6)$$

где J – энергия ионизации, эВ;

α_3 – коэффициент поляризуемости газа;

$k = 0,863 \cdot 10^{-4}$ эВ/К – постоянная Больцмана;

m – показатель температурной зависимости $D_{12} \sim T^n$;

a, b – коэффициенты, зависящие от значений J_1 .

Уравнение переноса излучения [64]:

$$\Omega \cdot \text{grad } I + \chi \cdot I = \frac{\chi \cdot \sigma \cdot T^4}{\pi}, \quad (7)$$

где Ω – направление луча;

I – интенсивность излучения, Вт/м²;

χ – коэффициент поглощения среды, м⁻¹;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт·м⁻²·К⁻⁴.

Физические константы для уравнений (5)-(7) приведены в [61,62,65].

Система уравнений (1-7) решалась при следующих граничных условиях (рис. 3):

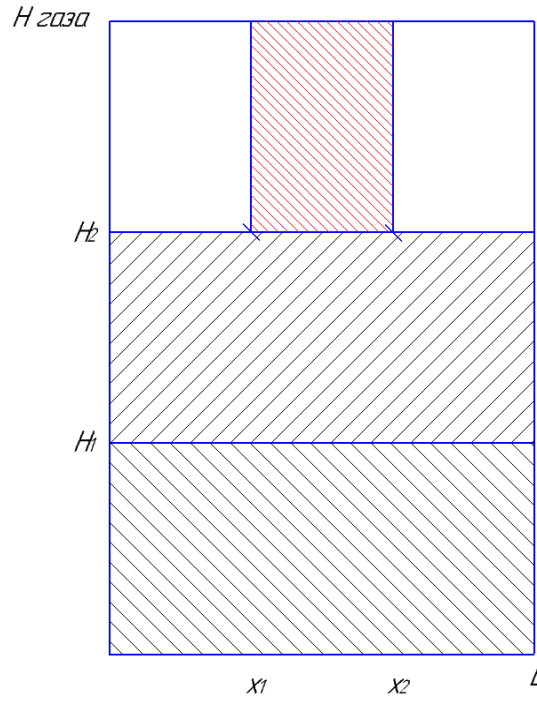


Рисунок 3 – Область решения задачи

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < L, 0 < y < H_2, \quad (8)$$

$$t = 0: T = T_{\text{газа}}, 0 < x < L, H_2 < y < H_{\text{газа}}, \quad (9)$$

$$x = 0, 0 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0, \quad (10)$$

$$x = l, 0 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0, \quad (11)$$

$$y = 0, 0 < x < l: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0, \quad (12)$$

$$y = H_{\text{газа}}, 0 < x < L: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0, \quad (13)$$

$$y = H_1, x_1 < x < x_2: \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y}, t > 0, \quad (14)$$

$$y = H_2, 0 < x < x_1: \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y}, t > 0, \quad (15)$$

$$y = H_2, x_1 < x < x_2: \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} - (Ki_{EV} - Ki_L) \cdot \Psi(X_L; Y_L), t > 0, \quad (16)$$

где $Ki_{EV} = (W_{EV} \cdot Q_{EV}) / (T \cdot \lambda)$, $Ki_L = I_0 \cdot l \cdot (1 - k_{отр}) / (T \cdot \lambda)$ – критерий Кирпичева, описывающий тепловой эффект испарения и плавления соответственно;

Ψ – функция Хэвисайда;

W_{EV} – скорость испарения металла, кг/(м²·с);

Q_{EV} – теплота испарения металла, Дж/кг;

$k_{отр}$ – коэффициент отражения паров металла.

$$y = H_2, x_2 < x < l: \Lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} = \Lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y}, t > 0, \quad (17)$$

$$x = 0, H_2 < y < H_{газа}: \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0, t > 0, \quad (18)$$

$$x = l, H_2 < y < H_{газа}: \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0, t > 0, \quad (19)$$

$$y = H_{газа}, 0 < x < l: \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0, I = I_0, t > 0, \quad (20)$$

$$y = H_2, 0 < x < l: \frac{\partial \zeta}{\partial y} = -1 \cdot \frac{W_{EV}}{\rho \cdot D_{12}}, t > 0, \quad (21)$$

$$y = H_2, 0 < x < x_1: \frac{\partial I}{\partial y} = 0, t > 0, \quad (22)$$

$$y = H_2, x_1 < x < x_2: \frac{\partial I}{\partial y} = 0, t > 0, \quad (23)$$

$$y = H_2, x_1 < x < x_2: I = \frac{\chi \cdot \sigma \cdot T^4}{\pi}, t > 0, \quad (24)$$

$$x = 0, H_2 < y < H_{газа}: \frac{\partial I}{\partial x} = 0, t > 0, \quad (25)$$

$$x = L, H_2 < y < H_{газа}: \frac{\partial I}{\partial x} = 0, t > 0, \quad (26)$$

$$y = H_{газа}, 0 < x < x_1: \frac{\partial I}{\partial y} = 0, t > 0, \quad (27)$$

$$y = H_{газа}, x_1 < x < x_2: \frac{\partial I}{\partial y} = 0, t > 0. \quad (28)$$

С целью проведения параметрического анализа и упрощения процедуры математического моделирования система (1)-(28) решалась в безразмерных переменных, при этом теплофизические характеристики металлов и газа обезразмерены относительно теплофизических характеристик

металла верхней пластины в твердом состоянии. Тогда система (1)-(28) принимает вид:

Уравнение энергии для верхней пластины:

$$\frac{C_1 \cdot P_1}{Fo_1} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) + Pom_1, \quad (29)$$

$$Fo_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1} \cdot \frac{ht}{l^2},$$

$$Pom_1 = \frac{Q_{melt1} \cdot \rho_1 \cdot \dot{S} \cdot \delta \cdot l^2}{hd \cdot \lambda^* \cdot T^*},$$

$$\dot{S} = \frac{d\xi}{d\tau}.$$

Уравнение энергии для нижней пластины:

$$\frac{C_2 \cdot P_2}{Fo_2} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) + Pom_2, \quad (30)$$

$$Fo_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \cdot \rho_2} \cdot \frac{ht}{l^2},$$

$$Pom_2 = \frac{Q_{melt2} \cdot \rho_2 \cdot \dot{S} \cdot \delta \cdot l^2}{hd \cdot \lambda^* \cdot T^*},$$

где $C=c/c^*$, $P=\rho/\rho^*$, $\Lambda=\lambda/\lambda^*$, $\theta=T/T^*$ – безразмерные теплоемкость, плотность, теплопроводность и температура, соответственно;

$c^*, \rho^*, \lambda^*, T^*$ – параметры обезразмеривания;

$X = x/l, Y = y/l$ – безразмерные координаты;

Pom – критерий Померанцева;

Fo – число Фурье;

Q_{melt} – теплоты плавления, кДж/кг;

δ – дельта-функция Дирака;

hd – фронт размазывания, м;

l – длина пластины, м.

Уравнение энергии описываемого процесса в безразмерных величинах для газа:

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + PomI \cdot \text{div} E_{isl}, \quad (31)$$

$$Fo_3 = \frac{\lambda_3}{c_3 \cdot \rho_3} \cdot \frac{ht}{l^2},$$

$$PomI = \frac{l^* \cdot l}{\lambda^* \cdot T^*},$$

где l^* – мощность лазера, Вт/м²;

$E_{isl} = l/l^*$ – безразмерная интенсивность излучения.

Уравнение диффузии в газовой области:

$$\frac{1}{Fod} \frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial Y^2} \right), \quad (32)$$

$$Fod = \frac{t \cdot D_{13}}{l^2},$$

где ζ – массовая концентрация паров металла в газе, кг/кг;

Fod – диффузионное число Фурье.

Коэффициент диффузии:

$$D_{13} = 2,66 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{T^3 \cdot (M_1 + M_3) / (2 \cdot M_1 \cdot M_3)}}{p \cdot q_{13}^2 \cdot \Omega^{(1,1)*}(T^*)}, \frac{m^2}{c}, \quad (33)$$

Приведенный интеграл взаимодействия молекул первого и второго компонента [63]:

$$Q_{13}^{(1,1)} \cdot \left(\frac{k \cdot T}{J_3} \right)^m \cdot \alpha_3^{-\frac{2}{3}} = a \cdot \exp \left(b \cdot \frac{J_3}{J_1} \right). \quad (34)$$

Уравнение переноса излучения [64]:

$$\Omega \cdot \text{grad } I + \chi \cdot I = \frac{\chi \cdot \sigma \cdot T^4}{\pi}. \quad (35)$$

Система уравнений (29)-(35) решалась при следующих начальных и граничных условиях (36)-(56):

$$t = 0: \theta = \theta_0, \quad 0 < x < L, \quad 0 < y < H_2, \quad (36)$$

$$t = 0: \theta = \theta_{\text{газа}}, \quad 0 < x < L, \quad H_2 < y < H_{\text{газа}}, \quad (37)$$

$$x = 0, \quad 0 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad t > 0, \quad (38)$$

$$x = l, 0 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, t > 0, \quad (39)$$

$$y = 0, 0 < x < l: \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, t > 0, \quad (40)$$

$$y = H_{\text{газа}}, 0 < x < L: \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, t > 0, \quad (41)$$

$$y = H_1, x_1 < x < x_2: \Lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial Y}, t > 0, \quad (42)$$

$$y = H_2, 0 < x < x_1: \Lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial Y}, t > 0, \quad (43)$$

$$y = H_2, x_1 < x < x_2: \Lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial Y} - (Ki_{EV} - Ki_L) \cdot \Psi(X_L; Y_L), t > 0, \quad (44)$$

$$y = H_2, x_2 < x < l: \Lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial Y}, t > 0, \quad (45)$$

$$x = 0, H_2 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial \zeta}{\partial X} = 0, t > 0, \quad (46)$$

$$x = l, H_2 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial \zeta}{\partial X} = 0, t > 0, \quad (47)$$

$$y = H_{\text{газа}}, 0 < x < l: \frac{\partial \zeta}{\partial Y} = 0, I = I_0, t > 0, \quad (48)$$

$$y = H_2, 0 < x < l: \frac{\partial \zeta}{\partial Y} = -1 \cdot \frac{W_{EV}}{\rho \cdot D}, t > 0, \quad (49)$$

$$y = H_2, 0 < x < x_1: \frac{\partial I}{\partial Y} = 0, t > 0, \quad (50)$$

$$y = H_2, x_1 < x < x_2: \frac{\partial I}{\partial Y} = 0, t > 0, \quad (51)$$

$$y = H_2, x_1 < x < x_2: I = \frac{\chi \cdot \sigma \cdot T^4}{\pi}, t > 0, \quad (52)$$

$$x = 0, H_2 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial I}{\partial X} = 0, t > 0, \quad (53)$$

$$x = L, H_2 < y < H_{\text{газа}}: \frac{\partial I}{\partial X} = 0, t > 0, \quad (54)$$

$$y = H_{\text{газа}}, 0 < x < x_1: \frac{\partial I}{\partial Y} = 0, t > 0, \quad (55)$$

$$y = H_{\text{газа}}, x_1 < x < x_2: \frac{\partial I}{\partial Y} = 0, t > 0. \quad (56)$$

Теплофизические параметры принимались следующим образом:

$$c = \begin{cases} c_{ж}, T \geq T_{пл}, \\ c_{тв}, T < T_{пл}; \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_{ж}, T \geq T_{пл}, \\ \rho_{тв}, T < T_{пл}; \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{ж}, T \geq T_{пл}, \\ \lambda_{тв}, T < T_{пл}. \end{cases}$$

Задача (29)-(35) решалась методом конечных разностей с применением неявного четырехточечного разностного шаблона. Задача плавления решалась с применением метода квазинявного выделения фронта плавления.

2.3 Тестовые задачи

С целью верификации математической модели решен ряд тестовых задач [66].

2.3.1 Одномерное уравнение теплопроводности

Исследуется процесс теплопередачи через плоскую бесконечную пластину (рис. 4), на левой границе которой поддерживается постоянная температура T_l , а на правой границе – T_p . Начальная температура T_0 , источники тепловыделения в пластине отсутствуют.

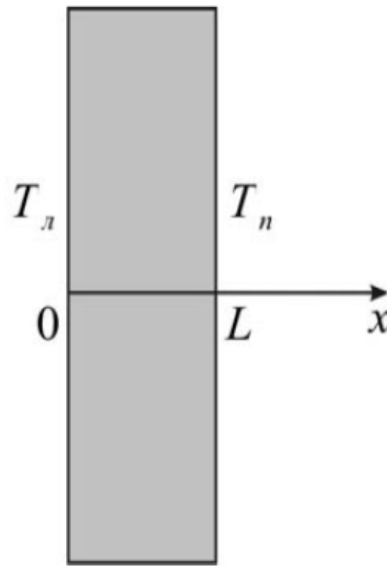


Рисунок 4 – Выкопировка из [66]. Область решения задачи

Уравнение энергии в этом случае имеет вид:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < L.$$

Краевая задача для данного уравнения принимает вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L,$$

$$x = 0: T = T_l, t > 0,$$

$$x = L: T = T_p, t > 0,$$

Примем, что пластина изготовлена из стали и зададимся температурами и размером пластины, тогда: $c = 460$ Дж/(кг · К), $\rho = 7800$ кг/м³, $\lambda = 46$ Вт/(м · К); $T_l = 300$ °С; $T_p = 100$ °С; $T_0 = 20$ °С; $L=0,1$ м.

В результате решения задачи получено температурное поле в пластине, представленное на рисунке 5.

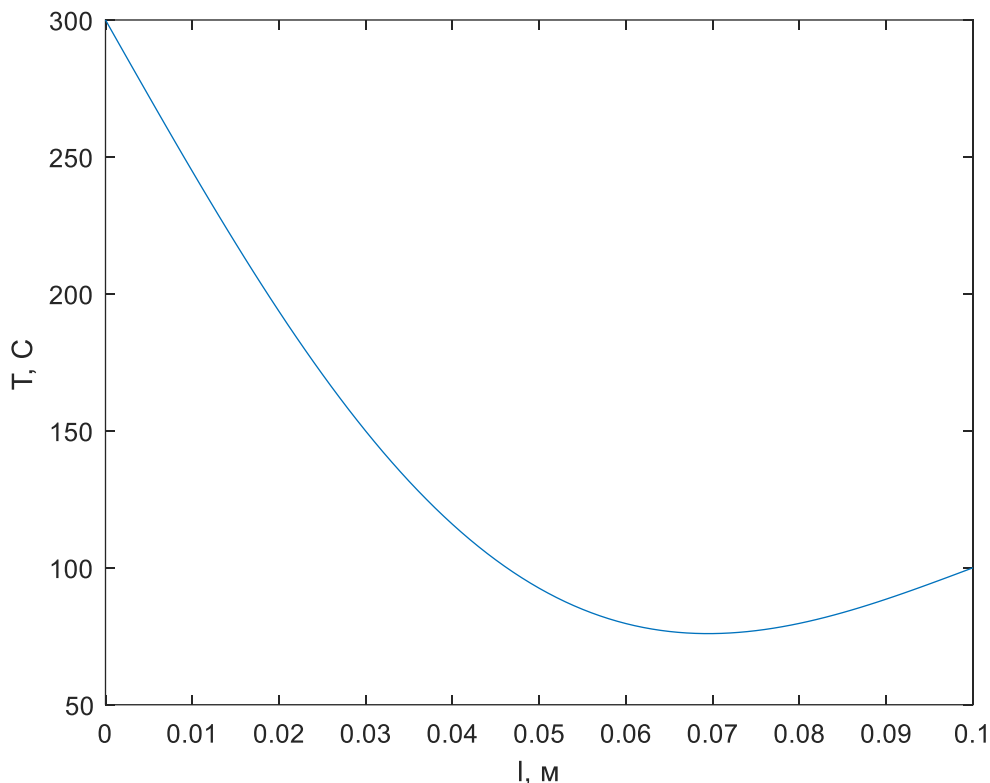


Рисунок 5 – Температурное поле в пластине в момент времени 60 с

Сравнивая результат решения данной задачи с результатом, полученным в [66], видно, что они аналогичны. Таким образом, задача решена верно.

2.3.2 Одномерное уравнение теплопроводности с нелинейными граничными условиями (излучение на границе)

Рассматривается теплоперенос в бесконечной пластине, на границах области моделируется теплообмен за счет конвекции и излучения. Математическая постановка выглядит следующим образом:

Уравнение энергии в этом случае имеет вид:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < L.$$

Краевая задача для данного уравнения принимает вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L,$$

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_1 \cdot (T_{e1} - T) + \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot ((T_{e1})^4 - T^4), t > 0, k_1 > 0,$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_2 \cdot (T_{e2} - T) + \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot ((T_{e2})^4 - T^4), t > 0, k_2 > 0,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – приведенная степень черноты; $\sigma = 5,699 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Проведем исследование температурного поля в бетонной пластине через 600, 1800, 3600 и 7200 секунд. Согласно [66], теплофизические характеристики бетона и его размеры следующие: $c = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$, $\rho = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\lambda = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; $T_0 = 50 \text{ °C}$; $L=0,3 \text{ м}$. На границах происходит контакт с внешней средой: $k_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, $k_2 = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $T_{e1} = 30 \text{ °C}$, $T_{e2} = 70 \text{ °C}$, $\varepsilon_1 = 0,5$, $\varepsilon_2 = 0,2$.

На рисунке 6 приведены температурные поля в пластине в соответствующие моменты времени.

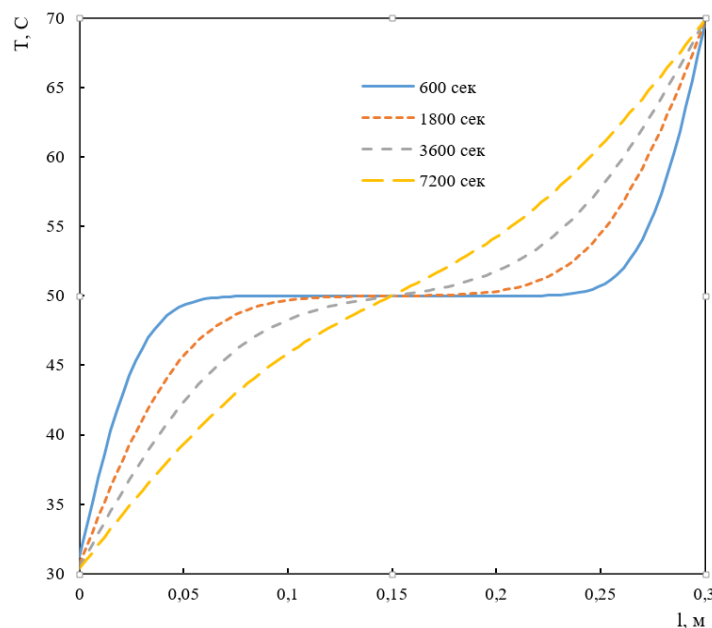


Рисунок 6 – Температурные поля в пластине в моменты времени 600, 1800, 3600 и 7200 секунд

Анализ температурных полей и их сравнение с данными, приведенными в [66], показывают, что задача решена верно.

2.3.3 Одномерное уравнение теплопроводности с подвижной границей
(на примере промерзания влажного грунта)

Влажный грунт находится в талом состоянии с начальной постоянной температурой $T_0=293$ К. В начальный момент времени на поверхности грунта температура $T_c=268$ К, температура замерзания $T_3=273$ К. В результате образуется промёрзший слой переменной глубины $\xi=f(t)$. Нижняя подвижная граница имеет температуру T_3 . На этой границе происходит переход их одного агрегатного состояния в другое, на что требуется теплота перехода Q_ϕ . Глубина слоя грунта $L=0,3$ м. Теплофизические характеристики промерзшей зоны грунта $c_1 = 2090$ Дж/(кг · К), $\rho_1 = 917$ кг/м³, $\lambda_1 = 2,3$ Вт/(м · К). Теплофизические характеристики талой зоны грунта $c_2 = 4220$ Дж/(кг · К), $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\lambda_2 = 0,6$ Вт/(м · К). Теплота фазового перехода $Q_\phi = 3,32 \cdot 10^5$ Дж/кг. Влажность грунта $w=1$ кг/кг. Установить зависимость времени промерзания от температуры среды. Область решения представлена на рисунке 7.

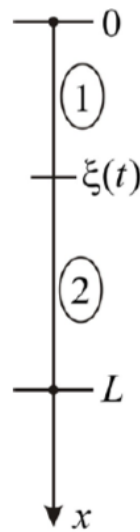


Рисунок 7 – Выкопировка из [66]. Область решения задачи

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < \xi(t), t > 0,$$

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \xi(t) < x < L, t > 0.$$

Краевая задача для данного уравнения принимает вид:

$$t = 0: T(x) = T_0, 0 \leq x \leq L,$$

$$\begin{aligned}
 x = 0: T(t) &= T_c, t > 0, \\
 x = L: \frac{\partial T}{\partial x} &, t > 0, \\
 x = \xi(t): \begin{cases} T_1 = T_2 = T_3, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = Q_\phi \cdot \rho \cdot w \cdot \frac{d\xi}{dt}. \end{cases}
 \end{aligned}$$

В результате решения задачи получена следующая зависимость (рис. 8).

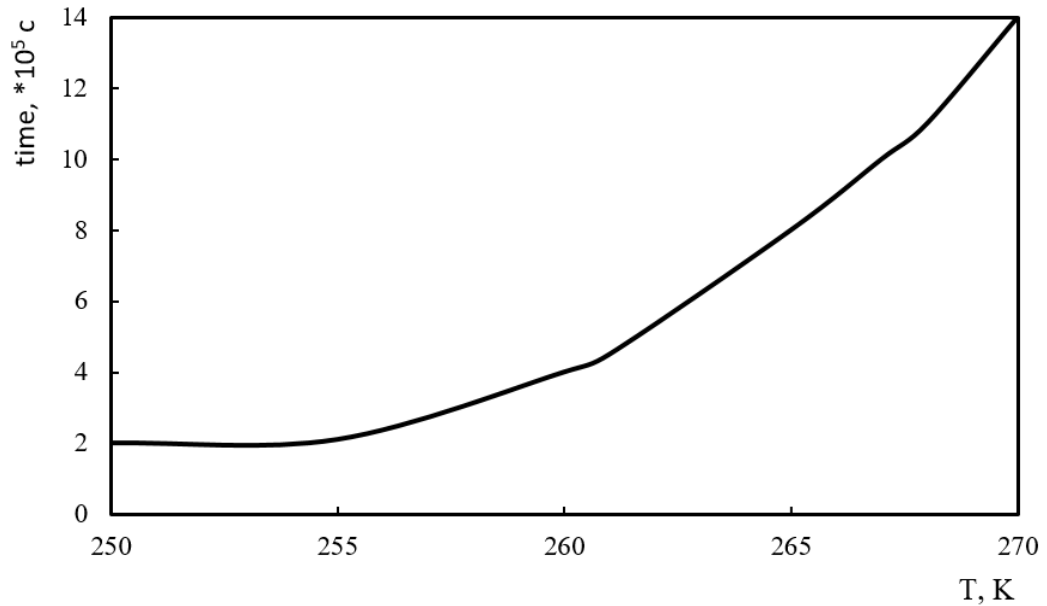


Рисунок 8 – Зависимость времени промерзания от температуры среды

Анализ зависимости, представленной на рисунке 8 и данных, представленных в [66], показывает, что задача решена верно.

Анализ результатов решения тестовых задач выявляет высокий прогностический потенциал разработанной математической модели.

3 Результаты математического моделирования

3.1 Влияние мощности лазера на характеристики плавления

В настоящее время в промышленности используется большое количество металлов и их сплавов, многие из которых имеют высокую стоимость ввиду своих качеств и свойств. В этих условиях при лазерной металлообработке необходимо учитывать их теплофизические характеристики и точно рассчитывать мощность лазера, чтобы не повредить металл.

Рассматривались процессы плавки диметаллической пластины лазерным излучением, верхний слой пластины был выполнен из алюминия и меди, а нижний – из свинца. Выбор этих металлов обусловлен их широким применением во многих отраслях промышленности, в том числе и высокоточных: так медь используется в конструкциях камер ракетных двигателей [67], а алюминий – в авиастроении и атомной промышленности, где он исполняет роль защитного покрытия оболочек ТВЭЛ [68].

Выбор мощности лазера является сложной оптимизационной задачей, которая включает затраты на электроэнергию, выбор площади пятна падающего излучения, определение теплофизических характеристик заготовки. В случае, если мощность лазера окажется ниже необходимой, металл не будет обработан должным образом, могут появиться дефекты поверхности материала. Максимальная мощность лазера ограничивается толщиной заготовки, свойствами металла, из которого она изготовлена. При мощности, превышающей максимально необходимую для данной заготовки, возможно разбрызгивание металла, что недопустимо при высокоточной обработке, так как возможно повреждение поверхности заготовки. Значительная толщина заготовки может привести к тому, что лазерный луч не будет проникать вглубь материала, что приведет к дефектам обработки.

Известно, что лучше лазерной обработке поддаются материалы с низкой теплопроводностью, так как в этом случае энергия лазера

концентрируется на меньшем участке. При обработке металла, обладающего высокой теплопроводностью, возможно образование грата – остатков расплавленного металла на краях реза.

На рисунке 9 представлена зависимость времени проплавления верхней пластины (выполненной в первом случае из алюминия, а во втором – из меди), от мощности лазера.

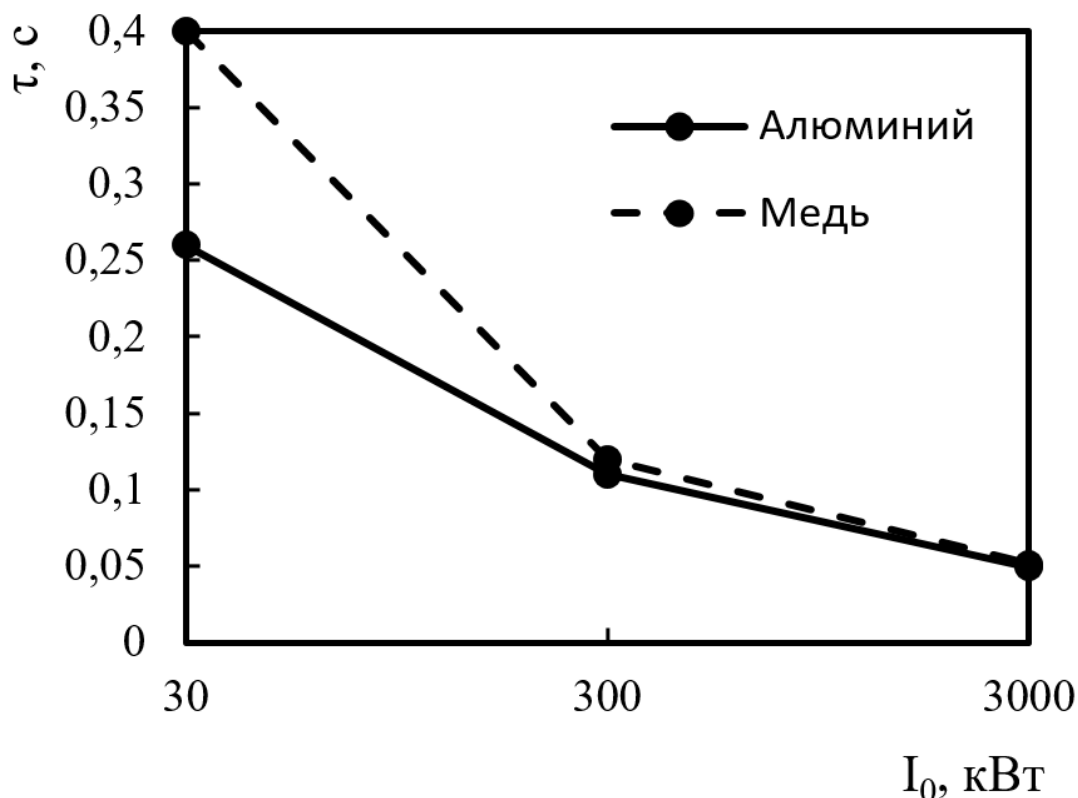


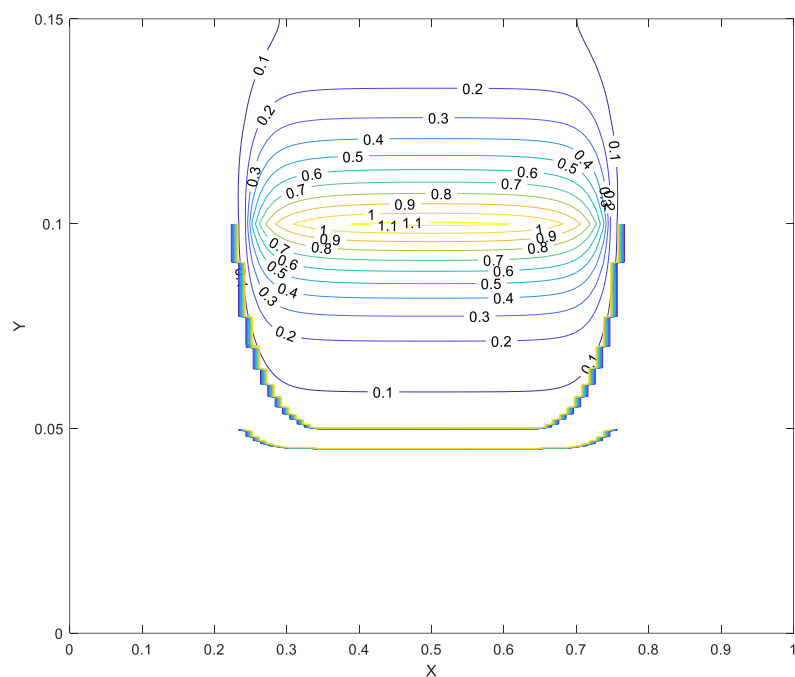
Рисунок 9 – Логарифмическая зависимость времени проплавления верхней пластины от мощности лазера

Как видно из рисунка 9, время проплавления медной пластины выше, чем алюминиевой, это объясняется тем, что алюминий обладает гораздо более высокой теплоемкостью, чем медь ($c_{Cu}=385$ Дж/(кг·К), $c_{Al}=951,3$ Дж/(кг·К)).

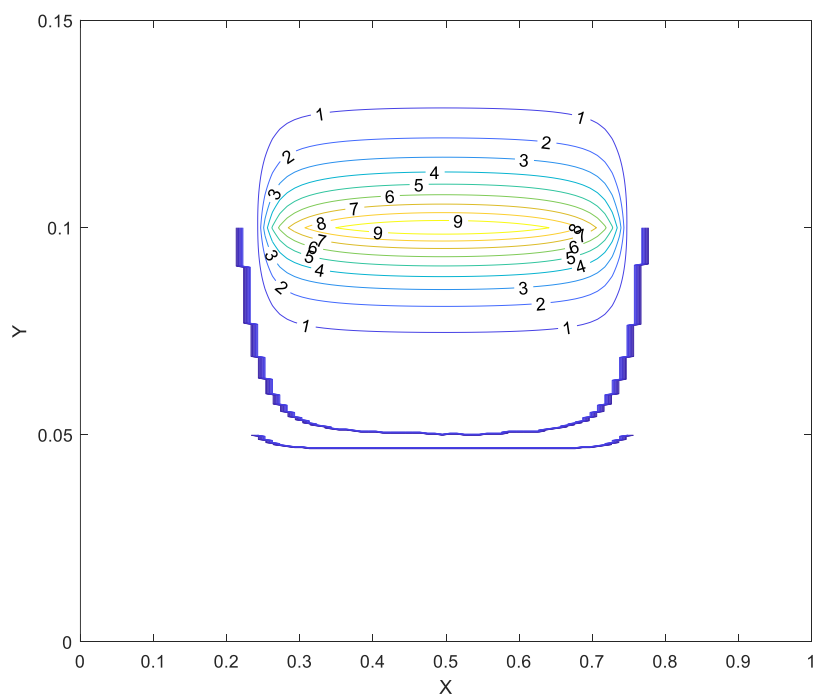
Можно отметить, что мощность лазера оказывает существенное влияние на динамику плавления, при этом условно можно выделить два режима плавления с условной границей раздела в 300 кВт. При таком значении мощности лазера наблюдается излом кривой ($\tau=f(I_0)$). Это обусловлено тем, что при таких значениях мощности лазера динамика плавления практически не изменяется. Последнее означает, что при обработке лазером формируется

фронт плавления, который обладает высоким эндотермическим эффектом, который создает своеобразный барьер, сильно тормозящий процесс плавления.

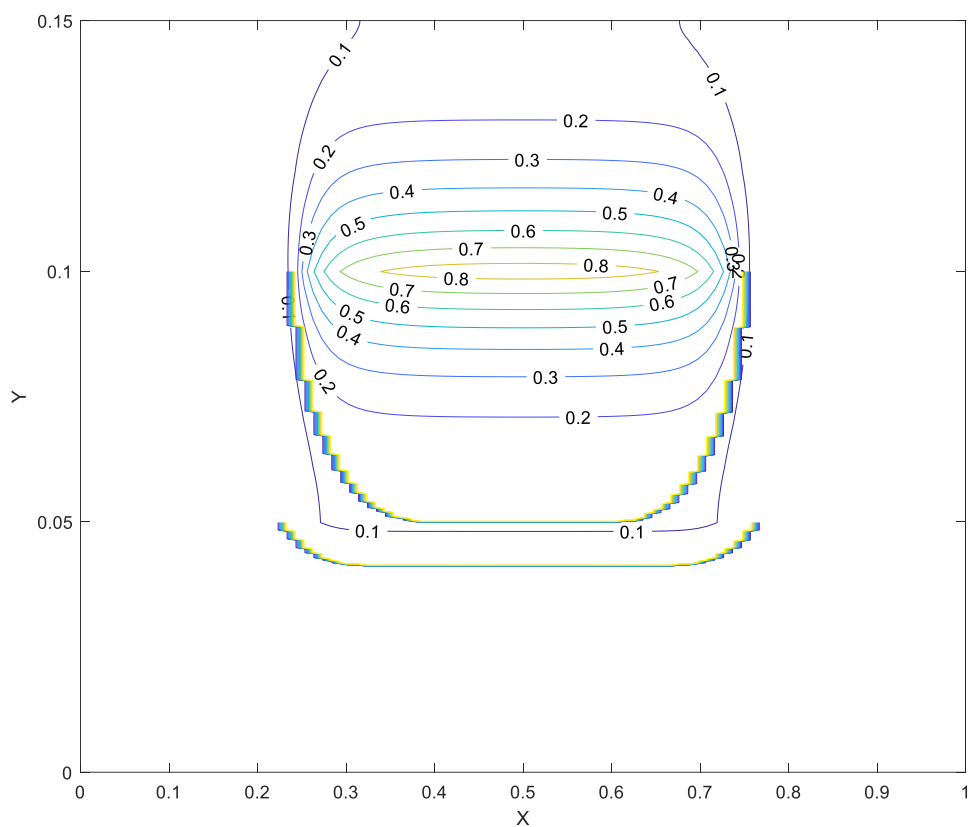
На рисунке 10 приведены соответствующие температурные поля (в эВ) в системе «алюминий-свинец» и «медь-свинец» при мощности лазера 300 и 3000 кВт в момент проплавления верхней пластины.



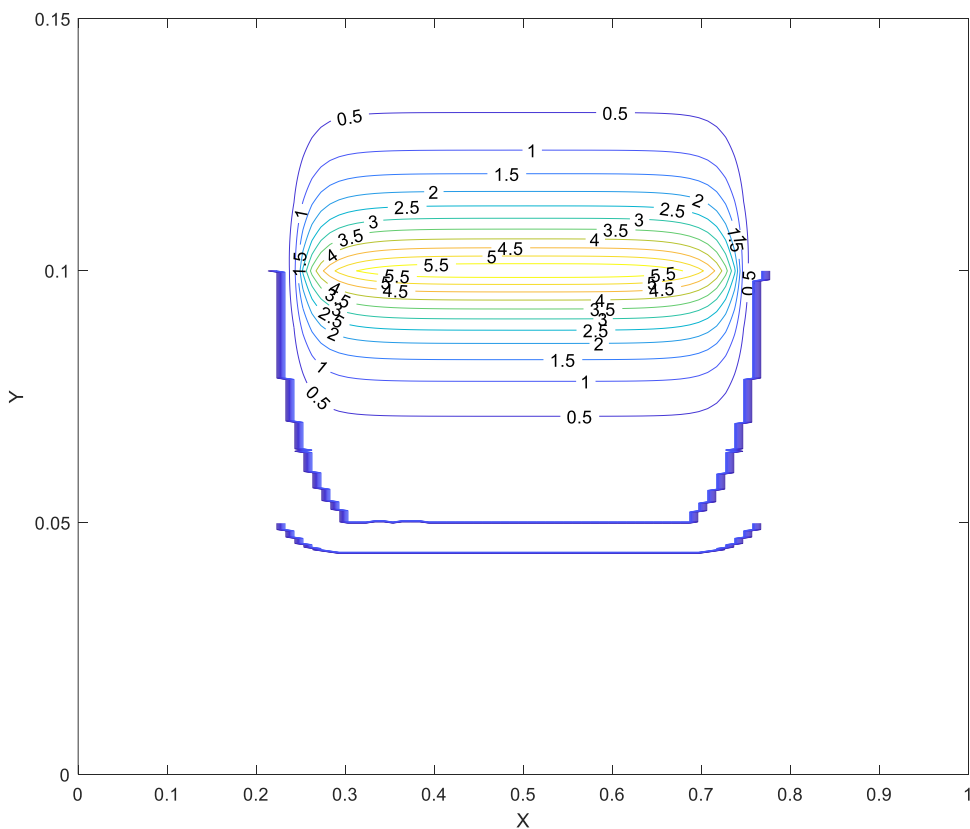
a



b



c



d

Рисунок 10 – Температурные поля в системе «алюминий-свинец» при мощности лазера 300 (a) и 3000 (b) кВт и «медь-свинец» при мощности лазера 300 (c) и 3000 (d) кВт, при размере пластин $l=0,1$ м

Анализ рисунка 10 показывает, что величина температурных градиентов существенно зависит от мощности лазерного луча. При мощности лазера 300 кВт (рис. 10 а,с) температурные градиенты незначительны в сравнении температурными градиентами при мощности 3000 кВт (рис. 10 b,d). Высокие температурные градиенты в заготовке могут нанести значительный вред изделию при несоблюдении технологии процесса, например, при быстром охлаждении, что может вызвать образование дефектов в его структуре. В связи с этим необходимо подбирать мощность лазера для каждой заготовки в зависимости от ее толщины и теплофизических характеристик.

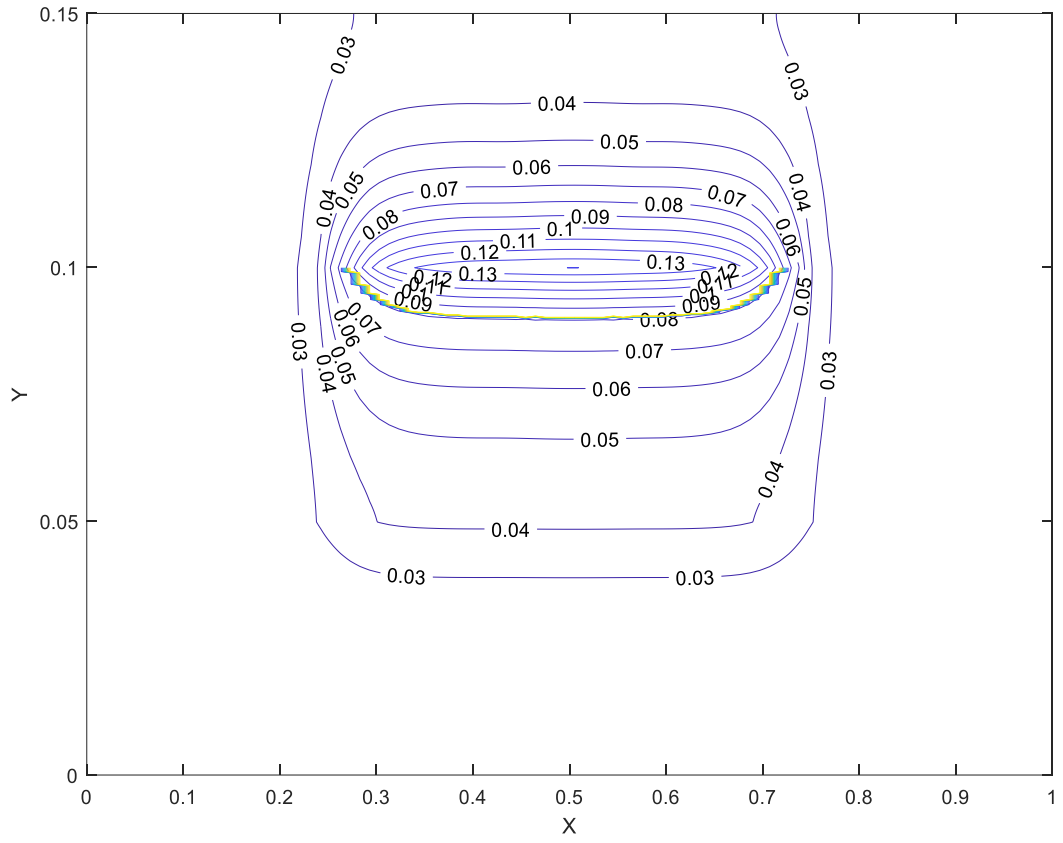
3.2 Влияние металлов на характеристики плавления

Как было указано выше, выбор мощности лазера является сложной оптимизационной задачей, одним из влияющих факторов которой является вид обрабатываемого металла.

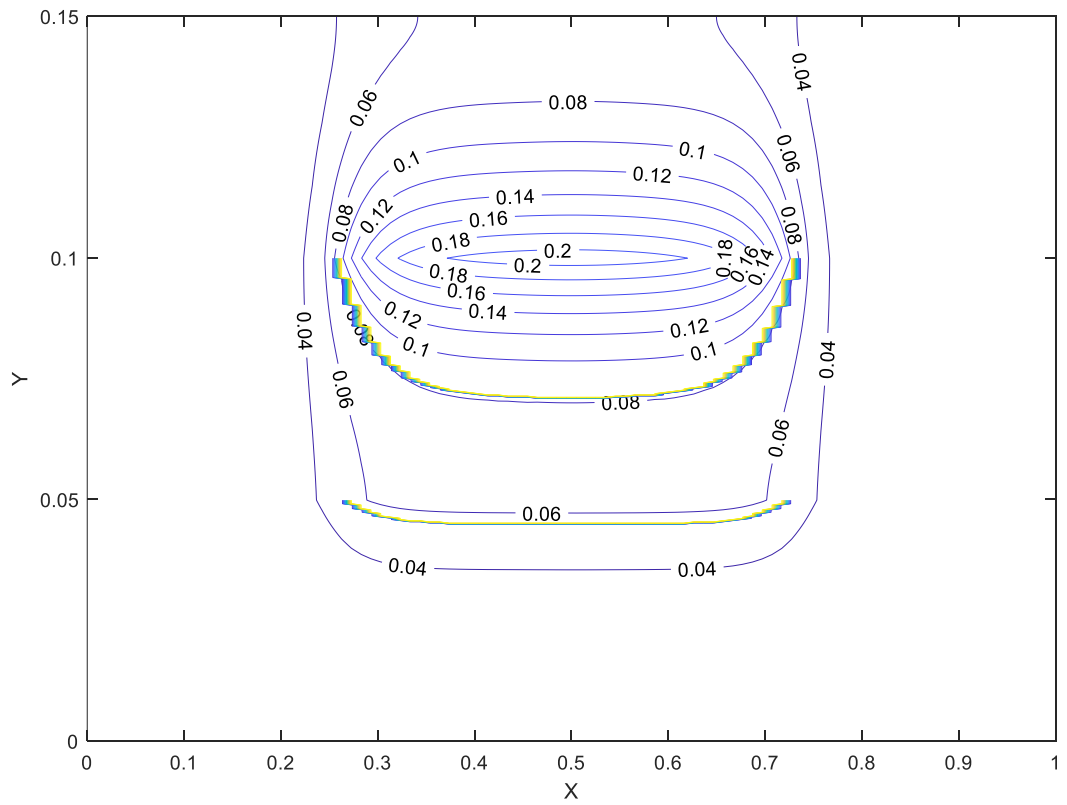
Мощность лазера, используемая для обработки материала, во многом зависит от его теплофизических характеристик. Согласно [69], основное влияние на температурное поле оказывает теплопроводность. Оба металла – алюминий и медь, имеют высокую теплопроводность, что широко используется в промышленности, однако это имеет и свои минусы. Фронт плавления при обработке изделий из этих металлов получается «широким», стремится распространиться не вглубь материала, а по его ширине. Это способствует формированию предпосылок для использования специальных условий при обработке меди и алюминия, так изделия из этих металлов перед обработкой рекомендуется предварительно подогреть, а область воздействия должна быть очень концентрированной [70].

Относительная небольшая плотность алюминия также создает сложности при обработке. Вследствие последнего металл обладает высокой текучестью и, соответственно, необходимо использовать специальные теплоотводящие подкладки для управления процессом сварки [71].

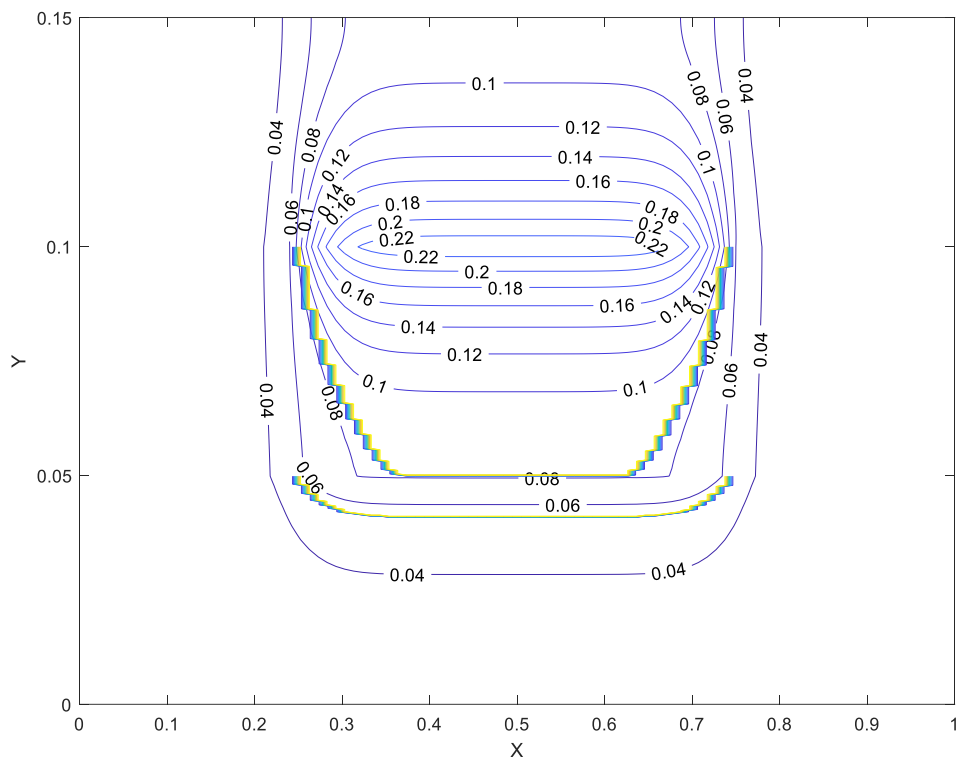
В опыте рассматривалось плавление в системе «алюминий-свинец» и «медь-свинец». На рисунках 11, 12 представлены температурные поля (в эВ) и фронты плавления при мощности лазера 30 кВт.



a

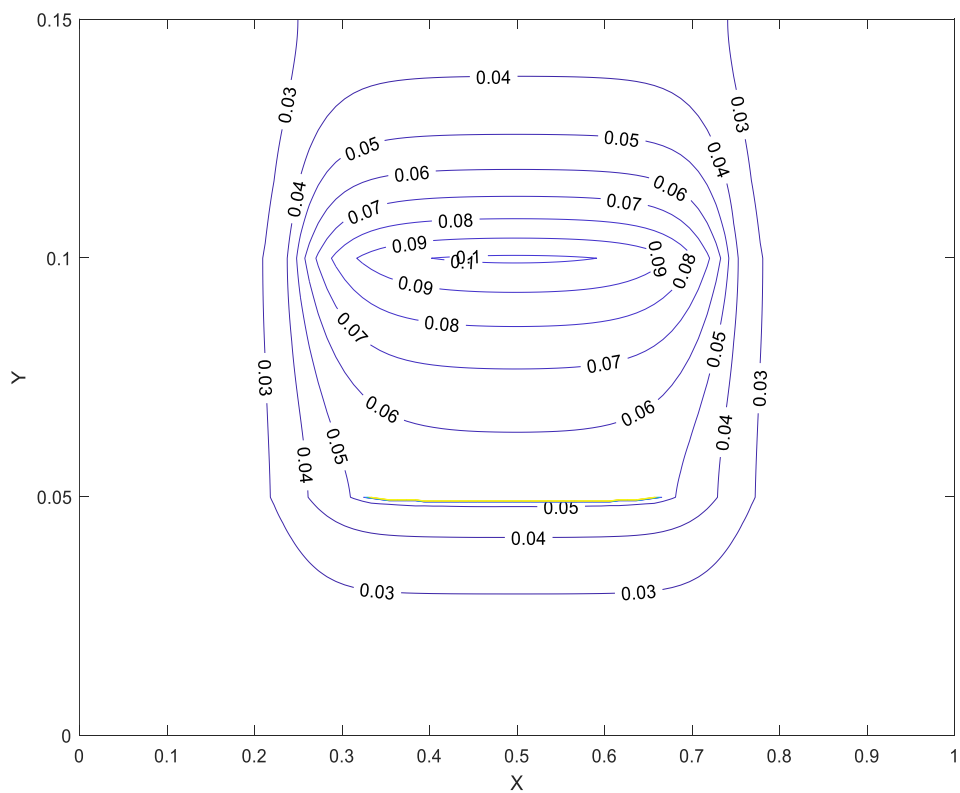


b

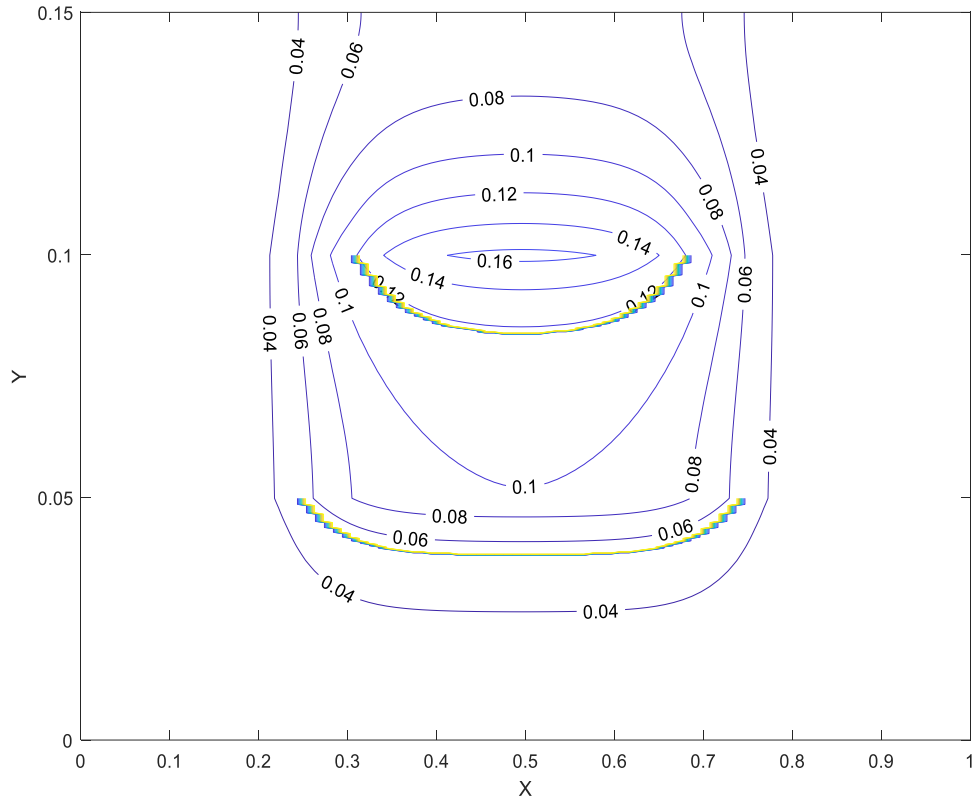


с

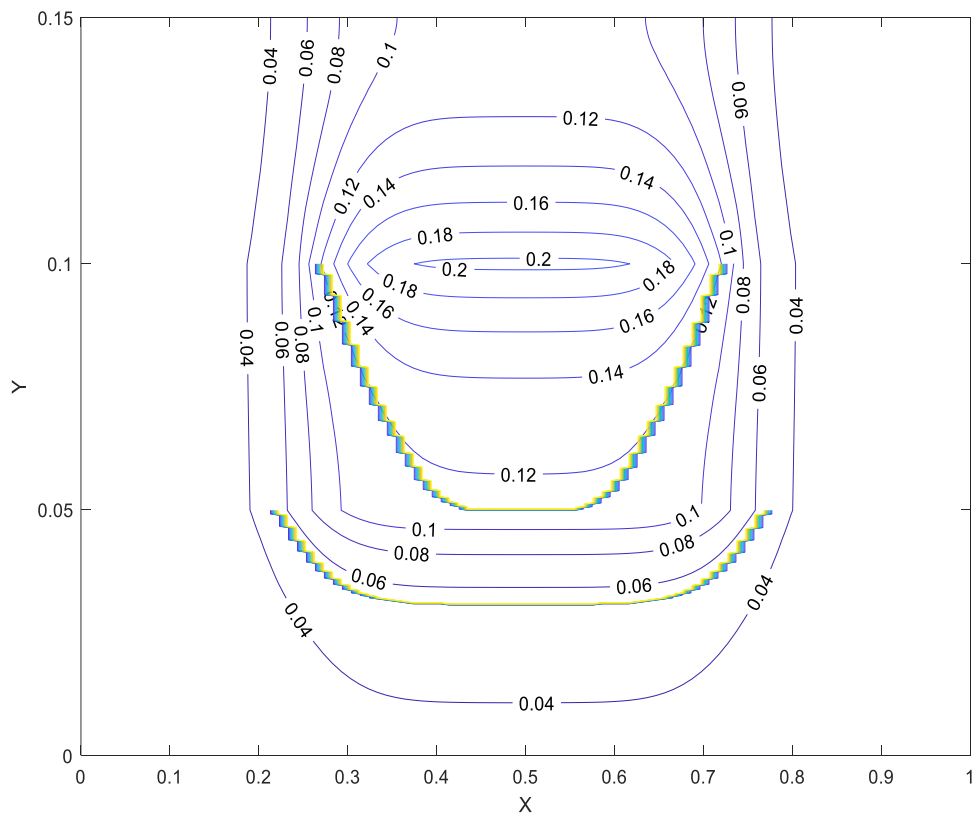
Рисунок 11 – Распределение температурного поля (эВ) и фронтов плавления в системе алюминий-свинец в моменты времени $(1/3)\tau_{пл}$ (а), $(2/3)\tau_{пл}$ (б) и $\tau_{пл}$ (с) при $\tau_{пл}=0,26$ с и мощности лазера 30 кВт, при размере пластин $l=0,1$ м



а



b



c

Рисунок 12 – Распределение температурного поля (эВ) и фронтов плавления в системе медь-свинец в моменты времени $(1/3)\tau_{пл}$ (а), $(2/3)\tau_{пл}$ (б) и $\tau_{пл}$ (с) при $\tau_{пл}=0,4$ с и мощности лазера 30 кВт, при размере пластин $l=0,1$ м

Заметно, что распределение температурных полей в системах «алюминий-свинец» и «медь-свинец» отличается. В соответствующие промежутки времени $\tau_{пл}$ – времени, за которое фронт плавления пройдет через верхнюю пластину, фронты двигаются по-разному. Так для системы «алюминий-свинец» видно, что в момент времени $(1/3)\tau_{пл}$ (рис. 11,а) идет только процесс плавления алюминиевой пластины, тогда как в системе «медь-свинец» в соответствующий момент времени $(1/3)\tau_{пл}$ (рис. 12,а) наоборот плавится только нижняя, свинцовая, пластина. В дальнейшем «отставание» фронта плавления в медной пластине от фронта в алюминиевой пластине увеличивается (рис. 11,б,с и рис. 12,б,с). Из-за большей теплопроводности свинец нижней пластины во втором случае успевает значительно расплавиться. Вследствие высокой теплопроводности обоих металлов фронт плавления в обоих случаях имеет значительную конусность, таким образом, конусность шахты плавления зависит от природы материала.

3.3 Влияние оттока теплоты на процесс плавления

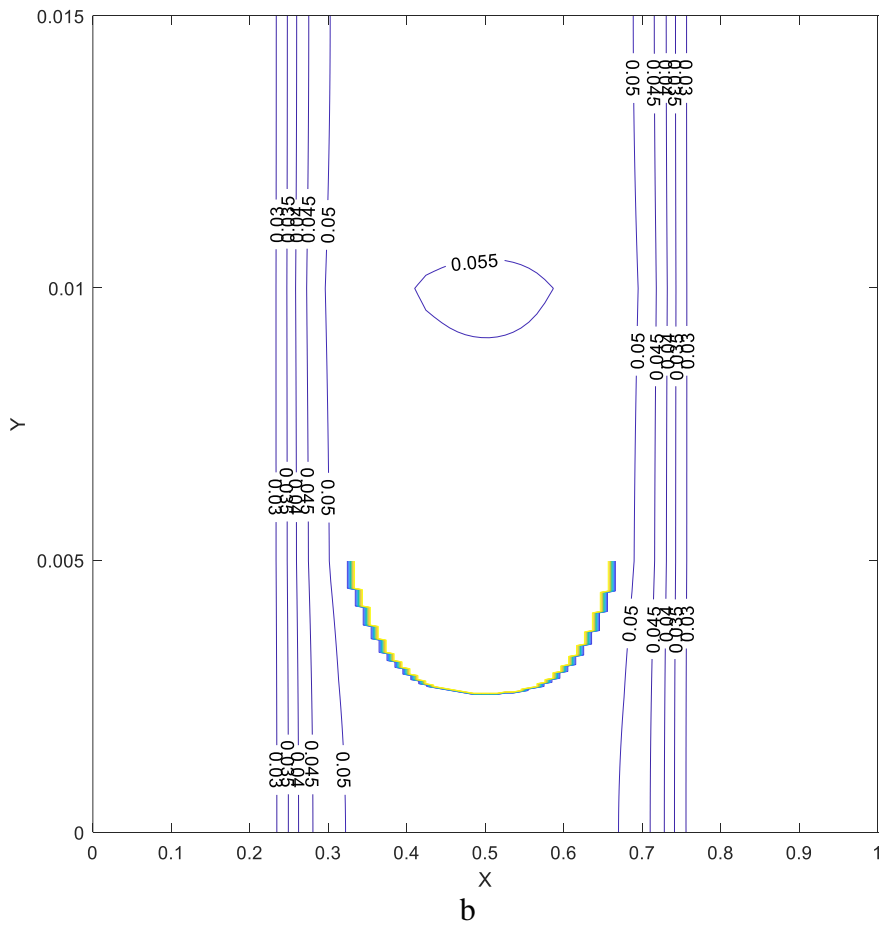
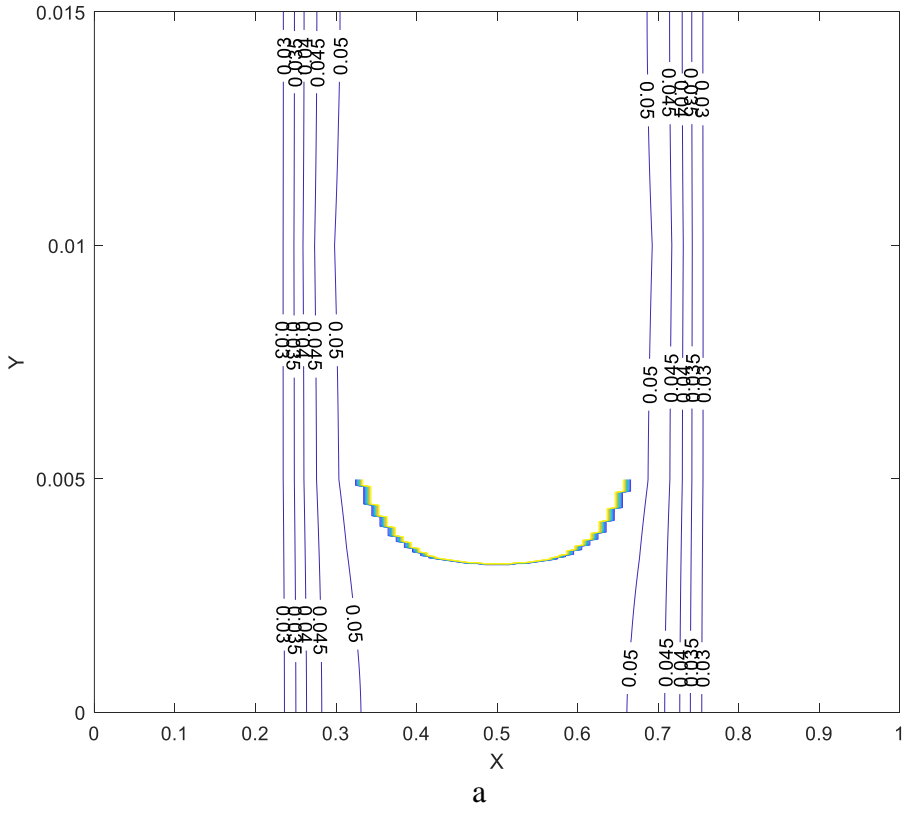
Отток теплоты может оказывать значительное влияние на процесс обработки металлов. Согласно технологии термической обработки, изделия из некоторых видов металлов и сплавов перед их обработкой необходимо нагреть до определенной температуры, дабы снизить скорость остывания обработанного металла во избежание образования трещин. Также предварительный подогрев снижает усадочное напряжение шва и прилегающего металла заготовки. Нарушение температурного режима перед и во время лазерной обработки изделия грозит возникновением трещин и термических напряжений, что недопустимо, и, соответственно, браком дорогостоящего изделия [72].

Рассматривалось плавление в системе «алюминий-свинец» в момент времени 0,08 с при мощности лазера 300 Вт и толщине обеих пластин 0,5 мм. Начальная температура пластин 293 К. Предполагалось, что нижняя пластина граничит с воздухом, коэффициент теплоотдачи которого при вынужденной конвекции неизменен и равен 2500 Вт/(м²·°С). Эксперимент проводился для трех температур: 100, 500 и 1000 К. Для этого были изменены соответствующие граничные условия внизу свинцовой пластины, имитирующие отток или подвод теплоты к ней (граничные условия третьего рода) (40):

$$y = 0, 0 < x < l: \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{Bi}{\Lambda} (\theta_e - \theta), t > 0,$$

где $Bi = \alpha \cdot l / \lambda_0$ – число Био.

На рисунке 13 представлены образовавшиеся в результате вычислительного эксперимента температурные поля в системе «алюминий-свинец». Времени опыта недостаточно для начала плавления алюминиевой пластины и плавление идет только в свинцовой пластине.



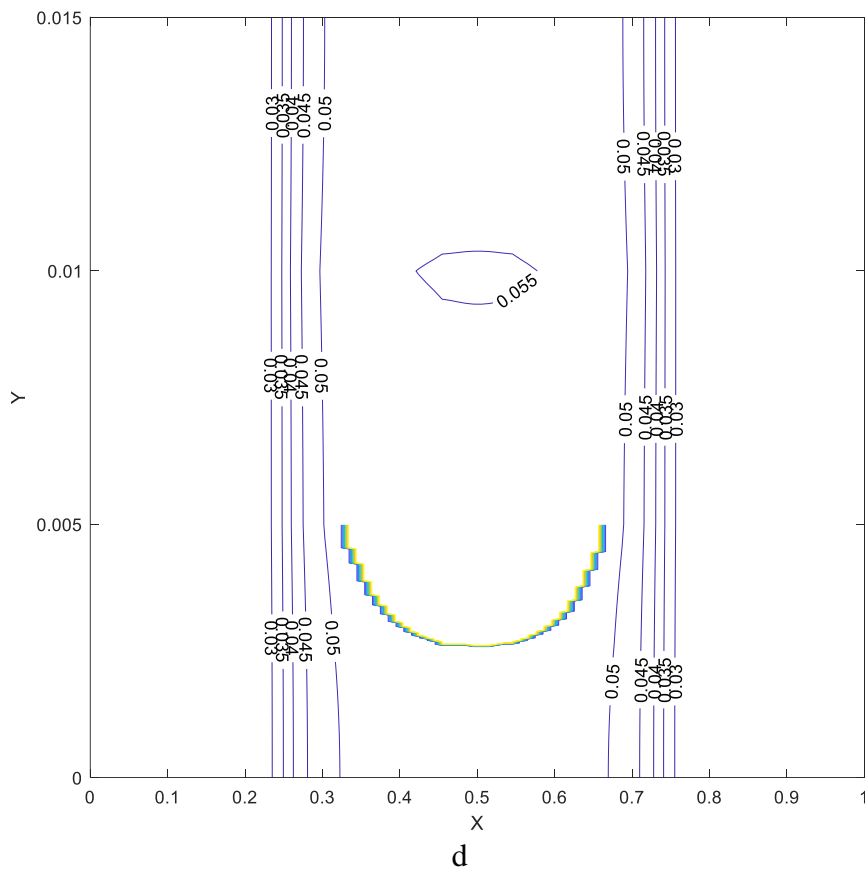
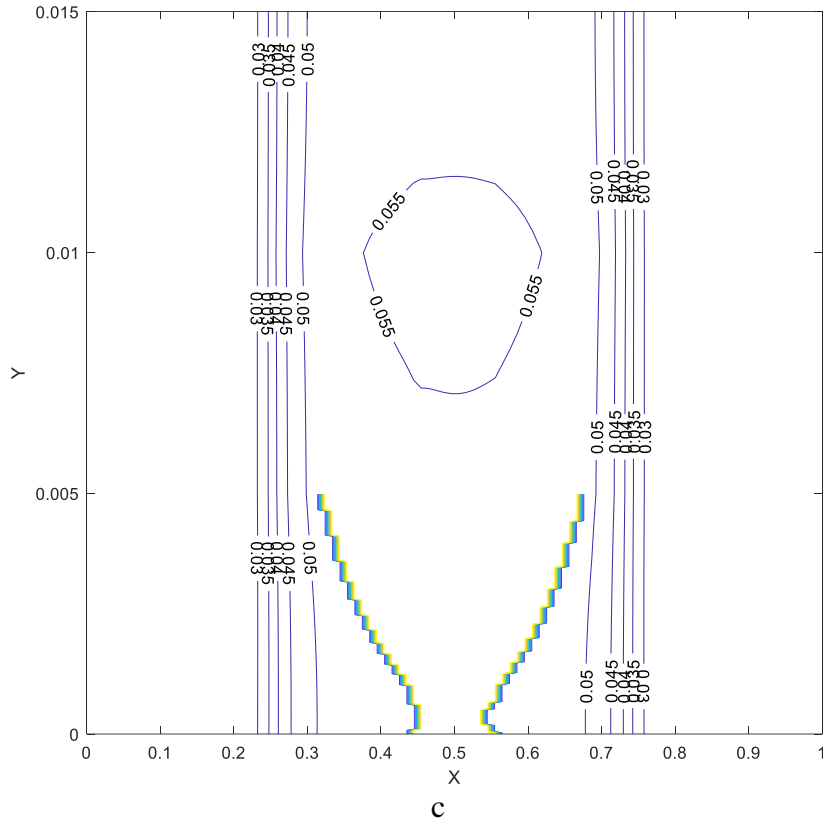


Рисунок 13 – Распределение температурного поля в системе «алюминий-свинец» для момента времени $\tau=0,08$ с при температуре среды 100 К (а), 500 К (б) и 1000 К (в) и в той же системе при тепловой изоляции (д), при размере пластин $l=0,1$ м

Как видно из рисунка 13, изменение температуры окружающей среды влияет на процесс нагрева и плавления. При температуре воздуха, равной 100 К (рис. 13, а), фронт плавления незначительно продвинулся вглубь свинцовой пластины. При данной температуре идет отток теплоты от заготовки, такой режим позволяет управлять режимом сварки и предотвращает образование широких расплавленных пластов. На рисунках 13, б, с показаны случаи нагрева пластины не только квантовым генератором, но и конвекцией с нижней стороны пластины, при этом температура окружающего воздуха выше начальной температуры заготовки, таким образом, воздух нагревает пластины, и может даже (рис. 13, с) инициировать плавление.

На рисунке 13, d для сравнения представлено распределение температурного поля в той же системе «алюминий-свинец» при тепловой изоляции внизу свинцовой пластины. В случае изолирования нижней пластины видно, что при подводе теплоты к нижней пластине процесс плавления идет активнее (рис. 13, б, с), чем при тепловой изоляции (рис. 13, d).

Анализ рисунков 13 а-d показывает, что в перспективе можно использовать управление процессами плавки и сварки металлов путем регуляризации режимов теплообмена с различных сторон и направлений

3.4 Эффект оптического пробоя при различных мощностях лазера

Оптический пробой – это быстропротекающий необратимый процесс, связанный с превращением среды из прозрачной в сильно поглощающую под действием интенсивного излучения, сопровождающийся разрушением структуры этой среды.

Оптический пробой возникает при высокой плотности мощности излучения. Вследствие высокой напряженности поля материя ионизируется, что, в свою очередь, ведет к плазмообразованию и появлению механических ударных волн. Возможно появление оптического пробоя в газах, жидкостях и твердых телах, в том числе в прозрачных средах [3].

При лазерной обработке металлов над сварочной ванной возникает облако парогазовой смеси, понижающее интенсивность лазерного излучения, падающего на заготовку, вследствие чего понижается и эффективность процесса обработки. Данное явление объясняется фотоэлектрическим поглощением [73].

Поглощение излучения обусловлено возбужденными атомами и процессами тормозного поглощения фотонов электронами в поле ионов и нейтральных атомов. Частицы конденсата, капли жидкой фазы и плазма, возникающая в результате оптического пробоя в парогазовой среде, также поглощают излучение. Таким образом, облако ионизированного газа отрицательно влияет на процесс плавления, рассеивая часть лазерного излучения на пути к обрабатываемому изделию. Следствием высоких плотностей мощности лазерного излучения при обработке может стать образование низкотемпературной плазмы. Предполагается, что низкая эффективность использования энергии при применении мощных лазеров обусловлена именно плазменными процессами поглощения и рассеяния излучения. Следствием этого является снижение мощности и степени сосредоточенности теплового пятна на поверхности материала [74].

В данном численном эксперименте рассматривалась зависимость времени возникновения оптического пробоя от мощности лазера. Оптический

пробой определялся в момент начала экспоненциального роста температуры в газовой области.

На рисунке 14 представлена зависимость времени возникновения оптического пробоя от мощности лазерного излучения. Заметно, что с увеличением мощности время пробоя уменьшается.

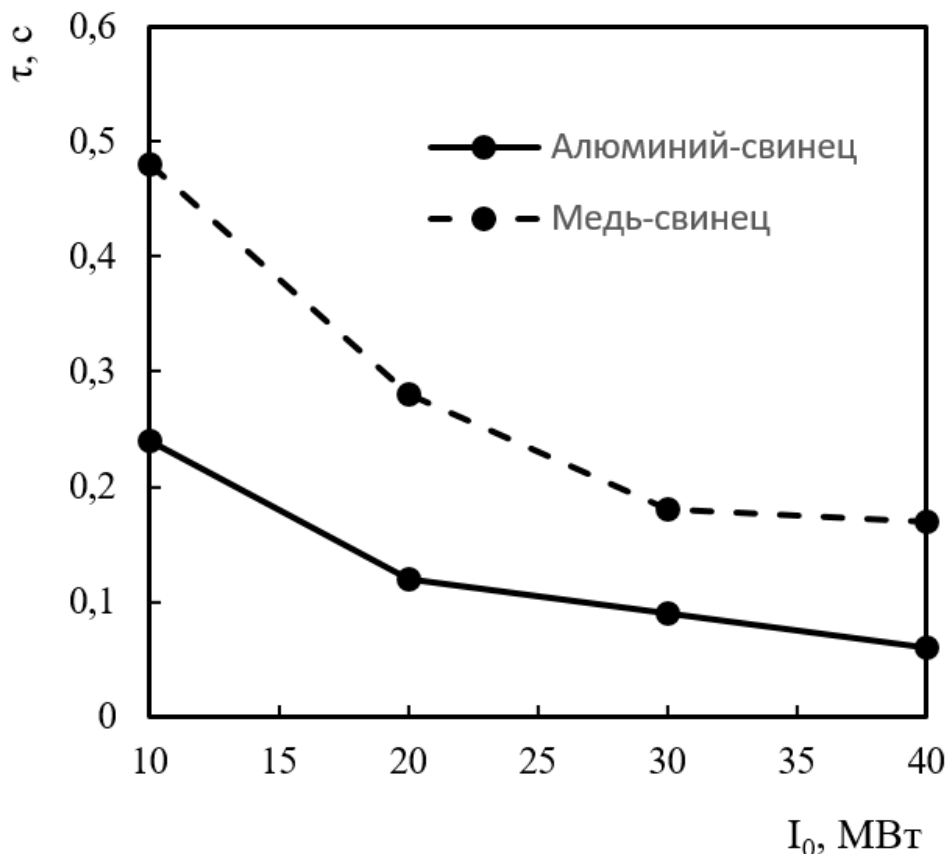


Рисунок 14 – Зависимость времени оптического пробоя от мощности лазера

Из рисунка 14 видно, что время формирования оптического пробоя в системе «медь-свинец-газовая среда» выше, чем в системе «алюминий-свинец-газовая среда». Последнее объясняется значительно меньшей теплотой испарения меди в сравнении с алюминием (табл. 1) и, как следствие, более высокой интенсивностью парообразования меди.

Как было указано выше, оптический пробой нежелателен и создает серьезные проблемы при лазерной обработке металлов, «экранируя» заготовку от лазерного луча. В связи с этим разработаны технологии, позволяющие избежать оптического пробоя. Так сварка ведется в среде смеси газов: защитного

газа, чаще всего аргона, и так называемого плазмподавляющего газа, в основном, гелия. В случае использования мощных лазеров рекомендуется подавать плазмподавляющий газ отдельно так, чтобы происходило «сдувание» ионизированной парогазовой смеси [19,75,76].

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Пурина Михаилу Владимировичу

Инженерная школа энергетики		Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова	
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Оклад инженера 17000 руб., оклад научного руководителя 19500 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений 20%</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30% от заработной платы</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Планирование работ НИР</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление сметы затрат на проект</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Анализ результатов НИР</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.04.2018
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадиевна			23.04.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Пурин Михаил Владимирович		23.04.2018

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Процессы лазерной обработки материалов приобретают все большее значение в промышленности благодаря своим свойствам, таким, как возможность обработки изделий сложной формы, способность концентрировать высокоэнергетическое излучение в очень узкой области, отсутствие механических повреждений на обрабатываемых поверхностях.

Лазерная обработка неразрывно связана с процессами плавления и кристаллизации, исследование которых в натуральных экспериментах очень сложно и дорого, поэтому особую значимость приобретает математическое моделирование, позволяющее исследовать протекание данных процессов без высоких материальных затрат.

Ныне существующие математические модели являются сложными в практическом применении, однако модель, на которой основывается исследование, представленное в данной работе, значительно проще.

Целью работы является математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно, в условиях интенсивных фазовых превращений (плавления, испарения металла) при воздействии лазером.

4.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения

Таблица 2 – Перечень работ и оценка времени их выполнения

№	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
1	Выдача и получение задания	Инженер НР	1
2	Оформление задания	Инженер	1
3	Исследование литературных источников	Инженер	14
4	Вывод математических коэффициентов	Инженер НР	1
5	Составление программного кода	Инженер	16

Продолжение таблицы 2

6	Проведение экспериментов с использованием программного кода	Инженер	7
7	Анализ результатов	Инженер	3
8	Оформление работы	Инженер	1
9	Прием и проверка работы	НР	1
Итого		Инженер НР	44 3

4.2 Смета затрат на проект

Смета проекта – документ, содержащий список затрат проекта, полученных на основе объемов работ проекта, требуемых ресурсов и цен, структурированный по статьям. Смета содержит предположения о стоимости проекта и необходимых средствах для его реализации и оформляется в виде четкого структурированного документа, отвечающего на вопросы: сколько, когда и на что будут израсходованы денежные средства в ходе выполнения проекта.

Смета определяется по формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з.пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{проч}} + K_{\text{накл}}, \text{ руб.},$$

где $K_{\text{мат}}$ – материальные затраты на канцелярские товары;

$K_{\text{ам}}$ – амортизация компьютерной техники, руб;

$K_{\text{з.пл}}$ – затраты на заработную плату инженера и научного руководителя, руб;

$K_{\text{с.о}}$ – затраты на социальные нужды (отчисления), руб;

$K_{\text{проч}}$ – прочие затраты, руб;

$K_{\text{накл}}$ – накладные расходы, руб.

4.2.1 Материальные затраты

Материальные затраты представляют собой стоимости потребленных материальных ресурсов в процессе производства продукции.

Материальные затраты на канцелярские товары принимаются в размере 1000 руб.

4.2.2 Амортизация

Амортизация – это постепенное перенесение стоимости средств компании и ее нематериальных активов на итоговую стоимость произведенного продукта.

Затраты на амортизацию компьютерной техники определяются по формуле:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \frac{\text{руб}}{\text{год}},$$

где $T_{\text{исп.кт}}$ – время использования компьютерной техники, дней;

$T_{\text{кал}}$ – календарное время, принимается равным 365 дням;

$C_{\text{кт}}$ – цена компьютерной техники, принимаем равной 25 тыс. руб.;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы компьютерной техники, принимаем равным 5 лет.

$$K_{\text{ам}} = \frac{44}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 603 \frac{\text{руб}}{\text{год}}.$$

4.2.3 Заработная плата

Заработная плата – это вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также выплаты компенсационного и стимулирующего характера.

Затраты на заработную плату инженера и научного руководителя считается по формуле:

$$K_{\text{з.пл}} = ЗП_{\text{инж}} + ЗП_{\text{НР}}, \text{руб.},$$

где $ЗП_{\text{инж}}$, $ЗП_{\text{НР}}$ – заработная плата инженера 10-го разряда и научного руководителя 13-го разряда соответственно, руб.

С учетом повышающих коэффициентов месячная заработная плата рассчитывается как:

$$ЗП_{\text{мес}} = K_1 \cdot K_2 \cdot ЗП_0, \text{руб.},$$

где K_1, K_2 – коэффициенты, учитывающие отпуск и географическое расположение района (районный коэффициент), принимаются, соответственно, равными 1,1 и 1,3;

$ЗП_0$ – месячный оклад, принимаемый равным 17000 руб. для инженера 10-го разряда и 19500 руб. для старшего преподавателя.

Тогда месячная заработная плата инженера и научного руководителя составит:

$$ЗП_{инж.мес} = 1,1 \cdot 1,3 \cdot 17000 = 24310 \text{ руб.},$$

$$ЗП_{НР.мес} = 1,1 \cdot 1,3 \cdot 19500 = 27885 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата определяется по формуле:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n^{\phi}, \text{ руб.},$$

где 21 – число рабочих дней в месяце;

n^{ϕ} – фактическое число дней в проекте.

Тогда фактическая заработная плата инженера и научного руководителя составит:

$$ЗП_{инж.ф} = \frac{24310}{21} \cdot 44 = 50935 \text{ руб.},$$

$$ЗП_{НР.ф} = \frac{27885}{21} \cdot 3 = 3984 \text{ руб.}$$

4.2.4 Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды - обязательные отчисления по нормам, установленным законодательством государственного социального страхования, в Фонд социального страхования РФ и прочее.

Затраты на социальные отчисления принимаются равными 30% от фактической заработной платы:

$$K_{с.о} = 0,3 \cdot K_{з.пл}, \text{ руб.},$$

$$K_{с.о} = 0,3 \cdot (50935 + 3984) = 16476 \text{ руб.}$$

4.2.5 Прочие расходы

Прочие расходы - это финансовый результат операций, не связанных с производством и реализацией, таких, как аренда, расходы на сертификацию и прочее.

Прочие затраты принимаем равными 10%:

$$K_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з.пл}} + K_{\text{с.о}}), \text{ руб.},$$

$$K_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (1000 + 603 + 50935 + 3984 + 16476) = 7300 \text{ руб.}$$

4.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы – это дополнительные затраты, не относящиеся напрямую к основному производству, не входящие в оплату труда основного персонала и в стоимость сырья.

Накладные расходы принимаем в размере 200% от размера заработной платы:

$$K_{\text{накл}} = 2 \cdot (50935 + 3984) = 109838 \text{ руб.}$$

Сведем полученные данные в таблицу 2.

Таблица 3 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	1000
Амортизация компьютерной техники	603
Заработная плата инженера и научного руководителя	54919
Социальные отчисления	16476
Прочие	7300
Накладные расходы	109838
Итого	190136

Заключение

По результатам выполнения работы была разработана математическая модель процесса лазерного нагрева полиметаллической мишени, учитывающая совместное протекание процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивных фазовых (плавления и испарения металла) превращений.

В процессе данной работы установлено, что мощность лазера оказывает существенное влияние на динамику процесса плавления.

По результатам выполнения работы можно сказать, что для обеспечения достаточно устойчивого процесса плавления лазерным лучом необходимо организовывать в области плавления и сварки постоянный поток инертного газа, обеспечивающий унос газообразных продуктов сварки из области плавления.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Пурина Михаилу Владимировичу

Инженерная школа энергетики		Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова	
Уровень образования	Бакалавр	Уровень образования	Бакалавр

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – процесс плавления полиметаллических структур. Область применения – металлообработка.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения:	При разработке проектируемого решения: – работа за компьютером может привести к снижению остроты зрения, заболеваниям опорно-двигательного аппарата; При эксплуатации: – работа в условиях повышенных концентраций паров металлов в воздухе.
1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	При разработке: – изоляция и заземление электрооборудования. При эксплуатации: – получение термических ожогов роговицы глаза, кожных покровов при несоблюдении правил безопасности.
2. Экологическая безопасность:	При разработке: – утилизация компьютерной техники исключает загрязнение окружающей среды пластиком и металлами. При эксплуатации: – выделяющиеся пары металлов необходимо улавливать с помощью фильтров для исключения попадания их в атмосферу.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	При разработке: – в результате неисправности возможно возгорание компьютера, рекомендуется использовать сетевые фильтры. При эксплуатации: – вследствие неисправности возможно возгорание лазерной установки.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	При разработке и эксплуатации: Ознакомление сотрудников с планом действий при возникновении пожара, наличие средств пожаротушения.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.04.2018
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Василевский Михаил Викторович	к.т.н.		23.04.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Пурин Михаил Владимирович		23.04.2018

5 Социальная ответственность

Введение

Социальная ответственность представляет собой объективную необходимость отвечать за нарушение социальных норм. Это сложная собирательная категория, рассматриваемая во многих науках. Среди прочего выделяют корпоративную и индивидуальную ответственность.

Корпоративная социальная ответственность – это концепция, предполагающая, что организации учитывают интересы общества, неся ответственность за влияние их деятельности на сотрудников, поставщиков и прочие заинтересованные стороны общественной сферы. Компании, принимающие на себя такую ответственность, лучше выглядят в глазах поставщиков, деловых партнеров и потенциальных сотрудников. Также стоит отметить, что организации, позиционирующие себя как социально ответственные субъекты экономической деятельности, имеют меньше претензий со стороны органов социального регулирования и могут претендовать на такие блага, как участие в выполнении госзаказов.

Индивидуальная социальная ответственность возникает, когда человек перестает заботиться только о себе и начинает нести ответственность за свои действия перед ближайшим окружением, окружающей средой.

Процессы лазерной обработки металлов связаны с процессами плавления, испарения и кристаллизации материалов, при этом экспериментальные исследования этих процессов сложны и влекут за собой значительные материальные затраты. В этих условиях наиболее выгодным и эффективным является применение аппарата математического моделирования, который позволяет проводить эффективные исследования процессов, протекающих при лазерной обработке металлов, без высоких материальных затрат.

Стоит отметить, что существующие на сегодняшний день математические модели, описывающие рассматриваемые процессы,

являются очень сложными, и соответственно, малоприменимыми к решению практических задач. Математическая модель, лежащая в основе данной работы, позволяет проводить исследования процессов тепло- и массопереноса при лазерном плавлении металлических структур с наименьшими затратами вычислительных мощностей ЭВМ.

Область применения разработки – металлообработка, где лазерная технология обработки металлов имеет такие преимущества, как высокая точность обработки изделий, отсутствие механических повреждений на обрабатываемых поверхностях, а также возможность работать со сложными геометрическими формами.

5.1 Производственная безопасность.

Любая деятельность человека сопряжена с воздействием на него ряда вредных факторов. Факторы, влияющие на исследователя при выполнении исследовательской работы, занесены в таблицу 1. Факторы, отрицательно влияющие на здоровье человека, называют вредными, факторы, которые могут привести к травме или гибели человека – опасными.

Таблица 4 – Опасные и вредные факторы производственной среды

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1	2	3	4
Освещенность	недостаточная освещенность рабочей зоны		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03
Вибрация	повышенный уровень вибрации на рабочем месте		СН 2.2.4/2.1.8.566-96
Шум	повышенный уровень шума на рабочем месте		СН 2.2.4/2.1.8.562-96
Электробезопасность		повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.038-82

Продолжение таблицы 4

	повышенный уровень электромагнитных излучений		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
Состояние воздушной среды	повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны		СанПиН 2.2.4.548-96
Пожароопасность		повышенный уровень пожароопасности	НПБ 105-03

5.1.1 Освещенность

Для обеспечения нормативных условий работы в помещении проводится оценка освещенности рабочей зоны согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Измерение освещенности помещения проводят при помощи специальных приборов – люксометров, также освещенность помещения указывается в паспорте объекта, либо определяется по методике, представленной в [77].

Освещение бывает искусственным и естественным. Естественное – освещение, созданное естественным путем, то есть Солнцем, и проникающее в помещение через световые проемы в строительных конструкциях. Искусственное освещение – освещение, создаваемое осветительными приборами, оно делится на рабочее, аварийное и дежурное.

Рабочее освещение должно обеспечивать необходимые регламентные условия на рабочих местах, аварийное освещение включается при повреждении системы питания основного освещения для облегчения эвакуации людей в случае какой-либо аварии или чрезвычайной ситуации. Дежурное освещение, включающееся в ночное время суток, обладает различными особенностями для различных типов помещений в зависимости от их назначения.

Неправильное освещение может вести к заболеваниям органов зрения, снижению работоспособности человека, возникновению головных болей и другим проблемам со здоровьем.

5.1.2 Шум и вибрация в помещении

Шум и вибрация являются вредными факторами при работе исследователя за компьютером. При длительном использовании компьютера смесь шумов и вибрации может действовать на человека раздражающе, вызывать повышенную утомляемость и раздражимость.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума в аудитории не должен превышать 75 дБ. Вентиляторы современных системы охлаждения персональных компьютеров и ноутбуков имеют частоту порядка 37 дБ, что находится в пределах нормы.

Вибрацию при работе компьютера создается жестким диском и вентиляторами, погасить ее можно, например, путем использования резиновых прокладок между корпусом компьютера и вибрирующими частями.

5.1.3 Электробезопасность

Электробезопасность – это система мероприятий для защиты людей и животных от вредного и опасного воздействия электрического тока, дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

К факторам опасного и вредного воздействия, связанным с использованием электроэнергии, относятся:

- 1) Завышенный уровень статического электричества;
- 2) Завышенный уровень электромагнитных излучений;
- 3) Завышенное напряжение в электросети, замыкание которой может пройти через тело человека.

Помещения разделяются на три класса опасности:

1. Помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20 °С, с влажностью 40—50%).

2. Помещения с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70—80%, токопроводящие полы, металлическая пыль, наличие заземления, большого количества оборудования).

3. Помещения особо опасные, в которых имеется наличие двух признаков из второй группы или имеются в помещении едкие или ядовитые взрывоопасные вещества.

Согласно данной классификации, компьютерный класс НТБ ТПУ относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствуют факторы, создающие повышенную или особую опасность, а именно:

- 1) токопроводящая пыль;
- 2) относительная влажность воздуха >75 %;
- 3) высокая температура воздуха (>35 °С);
- 4) токопроводящие полы;
- 5) химически активная или органическая среда.

При работе с компьютером необходимо провести оценку уровня электромагнитных излучений, допустимые уровни электромагнитных полей указаны в таблице 2.

Таблица 5 – Разрешенные уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	диапазон частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	диапазон частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500

5.1.4 Состояние воздушной среды

Микроклимат помещения – состояние внутренней среды помещения, оказывающее воздействие на человека, характеризуется показателями температуры воздуха и ограждающих конструкций, влажностью и подвижностью воздуха.

Оптимальная температура воздуха в учебных помещениях, согласно ГОСТ 30494-2011, составляет 16-18 °С, влажность 30-60%, скорость

движения воздуха не должна превышать 0,1 м/с.

Для поддержания благоприятного микроклимата помещения необходимо регулярно проветривать помещение, а также проводить влажную уборку.

5.1.5 Пожароопасность

Пожароопасность веществ и материалов представляет собой совокупность их свойств, характеризующих их способность к возгоранию и распространению горения.

Согласно ФЗ № 123, по пожарной опасности помещения, независимо от их назначения, делятся на пять категорий:

- 1) повышенная взрывопожароопасность (А);
- 2) взрывопожароопасность (Б);
- 3) пожароопасность (В1 - В4);
- 4) умеренная пожароопасность (Г);
- 5) пониженная пожароопасность (Д).

Компьютерный класс НТБ ТПУ можно отнести к категории Г – умеренная пожароопасность.

Основной причиной возникновения пожара при использовании компьютера является электрический ток.

Для предотвращения возникновения пожара необходимо следовать правилам:

- 1) Проводить очистку оборудования от пыли только отсоединив шнур электропитания от розетки;
- 2) При обнаружении нарушения изоляции трубопроводов, неисправности компьютера не проводить работу за данной ЭВМ;
- 3) Не использовать огнеопасных веществ на рабочем месте;
- 4) При обнаружении неисправности компьютера не пытаться самостоятельно проводить его ремонт.

Согласно нормам пожарной безопасности для помещений, в которых используются ЭВМ, первичным средством пожаротушения служат

огнетушитель углекислотный ОУ-5, либо хладоновый ОХЛ-10. Они позволяют потушить установки и материалы с напряжением до 1000 В.

Для предотвращения возникновения пожаров необходимо ознакомлять работающий персонал с требованиями пожарной безопасности, проводить соответствующие противопожарные мероприятия.

5.1.6 Производственная безопасность при эксплуатации проектируемого решения

Эксплуатация проектируемого решения осуществляется, преимущественно, путем работы за компьютером, а также работы людей в производственных, либо лабораторных помещениях, где находится лазерная установка. При этом сотрудникам необходимо соблюдать требования СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров».

5.2 Экологическая безопасность проекта

5.2.1 При разработке

Экологическую опасность в данном проекте представляет неправильная утилизация вышедшего из строя компьютерного оборудования, что чревато попаданием в окружающую среду пластика и металлов.

Компьютеры и оргтехника содержат такие вредные вещества, как свинец, ртуть, и некоторые количества драгоценных металлов. Статья 8.2 Кодекса об административных правонарушениях запрещает выбрасывать компьютерную технику вместе с бытовыми отходами. Утилизацией такой техники должны заниматься специализированные организации. Также при утилизации оборудования необходимо учитывать и требования Федерального закона № 41 от 1998 г. «О драгоценных металлах и драгоценных камнях», а также других подзаконных актов, постановлений, инструкций и методик.

5.2.2 При эксплуатации

В процессе лазерной обработки металлов выделяется значительное количество паров металлов, которые могут нанести вред окружающей среде. В связи с этим возникает необходимость использования специальных фильтров для улавливания этих паров. В работе рассматривалось плавление

свинца, пары которого пагубно влияют на здоровье человека и окружающую среду, поэтому сварочная установка должна быть дополнена воздушными фильтрами.

5.3 Безопасность при чрезвычайных ситуациях

5.3.1. При разработке

В процессе компьютерного моделирования наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар вследствие неисправности электропроводки. В целях безопасности применяют систему противопожарной защиты – совокупность технических средств и организационных мероприятий, направленных на уменьшение материального ущерба от пожара и предотвращения воздействия его на людей.

Противопожарная защита включает в себя:

- наличие пожарной сигнализации и средств оповещения специальных служб о пожаре;
- наличие и применение первичных средств пожаротушения;
- использование в конструкции помещения огнестойкие и малогорючие материалы;
- эвакуация людей.

5.3.2 В условиях эксплуатации

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар. Необходимо соблюдать требования пожарной безопасности и СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров».

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”. Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о

труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда” и др.

Управление охраной труда осуществляет блок федеральных органов исполнительной власти, руководимый Министерством здравоохранения и социального развития Российской Федерации (Минздравсоцразвития). Оно осуществляет функции государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере здравоохранения и социального развития, социального страхования, условий и охраны труда и т. д.

Функции по контролю и надзору, которые ранее осуществлялись Санэпиднадзором Минздрава России, переданы Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) осуществляет функции по надзору и контролю в сфере труда, а также государственный надзор и контроль за соблюдением, в частности, трудового законодательства и нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права; установленного порядка расследования и учета несчастных случаев на производстве.

Федеральное агентство по здравоохранению и социальному развитию (Росздрав) организует деятельность по установлению связи заболевания с профессией, государственной службы медико-социальной экспертизы и др.

Заключение

В заключение стоит отметить социальную роль лазерной обработки металлов в металлургии, в частности, в металлообработке.

Традиционные методы обработки металла, такие, как обработка резанием, сверление и другие, имеют ряд недостатков, ведущих к деградации окружающей среды. Среди прочего это выбросы возникающей при обработке материалов металлической пыли в атмосферу, а также проблема утилизации большого количества отработанных промышленных масел, используемых для охлаждения и смазывания металлообрабатывающих станков. К

сожалению, недобросовестные предприниматели часто экономят на услугах компаний, занимающихся сбором и переработкой таких отходов, вместо этого сливая отработанные масла в окружающую среду, нанося ей вред.

Лазерные установки, в свою очередь, не имеют в конструкции вращающихся и трущихся деталей, что исключает образование отходов в виде отработанных промышленных масел. Также стоит отметить, что в процессе лазерной обработки не образуется металлическая пыль, а высокая точность обработки позволяет снизить расход металла на допуски, припуски и обрубы краев заготовок.

Таким образом, использование лазерных установок в металлообработке позволяет снизить нагрузку на окружающую среду, тем самым внося свой вклад в снижение напряженности в социальной сфере.

Заключение

В выпускной квалификационной работе представлена математическая модель, описывающая совместное протекание процессов тепломассопереноса при воздействии лазером на полиметаллическую пластину.

Показано, что при достижении температуры фазовых переходов металлов образуется гетерогенная структура жидкой и твердой фаз металлов со значительно различающимися теплофизическими характеристиками.

Установлено, что мощность лазера оказывает существенное влияние на динамику плавления пластины. Показано, что время проплавления пластины зависит от теплофизических свойств ее материала. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что мощность лазерного излучения влияет и на распределение температур внутри заготовки, что необходимо учитывать при обработке металлов, так как высокие температурные градиенты могут вызвать деформации внутри заготовки.

При моделировании процессов тепломассопереноса, протекающих совместно, установлено влияние температуры окружающей среды на процесс плавления. Так показано, что повышение температуры окружающего воздуха до 1000 К инициирует процесс плавления с обратной стороны пластины. Таким образом подтверждено, что изменение условий теплообмена в перспективе можно использовать для улучшения и упрощения технологии обработки металлов.

В работе исследовано время возникновения оптического пробоя в зависимости от мощности лазера. С увеличением мощности время возникновения оптического пробоя уменьшается, что необходимо учитывать на практике.

Стоит отметить, что моделирование процессов тепломассопереноса является экономически выгодным, так как позволяет проводить весьма сложные расчеты без дорогостоящих натуральных экспериментов.

Внедрение лазерных станков для обработки металлов положительно сказывается на экологии, так как при их работе не выделяются отходы в виде масел, такая обработка связана с меньшими расходами металла.

Список публикаций студента

1. Mikhail Purin, Arkadii Zakharevich and Nadegda Gutareva. Mathematical modeling of melting during laser heating of metal plate//MATEC Web of Conferences 110, 01070 (2017).- Available at: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/24/mateconf_hmt2017_01070/mateconf_hmt2017_01070.html.

Список используемых источников

1. Белоусова И. М. Из истории создания лазеров. Обзорная статья // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. №2. с. 1-16.
2. Закалюкина Л. А., Погодаев С. В., Баннов В. Я. Технологии и применение лазерной обработки в современном производстве // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. - 2016 №1. с. 559-561.
3. Шахно Е. А. Физические основы применения лазеров в медицине. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.
4. Пиментел Дж., Кунрод Дж. Возможности химии сегодня и завтра: Пер с англ. – М.: Мир, 1992. – 288 с., ил.
5. Вейко В. П. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Раздел: Введение в лазерные технологии. / В. П. Вейко, А. А. Петров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 – 143 с.
6. Абильсиитов Г. А. Технологические лазеры: справочник в 2-х т./ Г. А. Абильсиитов и др.; под ред. Г. А. Абильсиитова // - М.: Машиностроение. Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация. - 1991. - 431 с.: ил.
7. Либенсон М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко / Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. СПб: НИУ ИТМО, 2014. - 181 с.
8. Райзер Ю.П. Мощные электроразрядные лазеры на углекислом газе. // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - №8, с. 99-104.
9. Скрыль Ю. В. Мощные СО₂-лазеры с ВЧ-накачкой. Принципы построения. / Ю. В. Скрыль, С. М. Слободян // Известия Алтайского государственного университета. – 2007. - №2, с. 122-128.
10. Сэм М.Ф. Лазеры и их применение // Соросовский Образовательный журнал. - 1996. - № 6. с. 92-98.

11. Аппарат для лазерной резки [Электронный ресурс] : МосЛазер. URL: <http://mos-laser.ru/news/apparat-lazernoy-rezki.php>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 01.04.2018 г.
12. Лазерная наплавка – износостойкие поверхности для любых металлических деталей [Электронный ресурс] : TUTMET.RU. URL: <http://tutmet.ru/lazernaja-naplavka-svarka-poverhnosti-metalla-tehnologija.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 01.04.2018 г.
13. Айрапетян В.С. Физика лазеров: учебное пособие / В.С. Айрапетян, О.К. Ушаков. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 134 с.
14. Харанжевский Е. В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Учебное пособие. / Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилёв - Ижевск: Изд-во “Удмуртский университет”, 2011. - 187 с.
15. Мазеин, П.Г. Применение станков лазерной резки: учебное пособие / П.Г. Мазеин, М.Р. Ахметов, С.Р. Сайфутдинов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. - 106 с.
16. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. - 52 с.
17. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / Батенин В.М., Бохан П.А., Бучанов В.В., Евтушенко Г.С. – М: Физматлит, 2011. - 616 с.
18. Гранковский С. Д. Книга о лазерах. - М., 1988. - 112 с.
19. Григорьянц А. Г. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов/ А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов; Под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 207 с.
20. Киммель Р. Роботизированная лазерная сварка – универсальный и экономичный технологический процесс // Фотоника. – 2009. - №2, с. 1-5.
21. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. - М., 2003. - 784 с.
22. Методы расчета нелинейных процессов теплового переноса [Текст]

/ В.В. Саломатов. - Томск: Изд-во Томского университета, 1976 - Ч.2. - 1978. - 183 с.

23. Мажукин В. И. О численном решении задачи Стефана на адаптивной сетке / Н. А. Дарьин, В. И. Мажукин // Дифференц. уравнения. - 1987. - №7, с. 1154-1160.

24. Алферов М.И. Воздействие пикосекундных лазерных импульсов на Si и полупроводниковые соединения A^3B^5 / Алферов М.И., Ковальчук Ю.В., Погорельский Ю.В. // Изв. АН СССР, Серия физическая. – 1985. - Т.49, № 6, с.1069-1075.

25. Карпов С.Ю. Плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения / С.Ю. Карпов, Ю.В. Ковальчук, Ю.В. Погорельский // Обзор. Физика и техника полупроводников. – 1986. - Т.20, в.11, с.1945-1969.

26. Данилюк И.И. О задаче Стефана // Успехи математических наук. – 1985. - т.40, с. 133-185.

27. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. – Рига, 1967. - 457 с.

28. Нейрманов А.М. Задача Стефана. - Новосибирск: Наука. - 1986. - 239 с.

29. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. – Рига. – 1980. - 178 с.

30. Лобов Б. Я. Теория кристаллизации в больших объемах. - М.: «Наука, 1975, 256 с.

31. Вайнштейн Б.К. Современная кристаллография. Том 3. Образование кристаллов. Под ред. Б.К. Вайнштейна. - М.: Наука. – 1980. - 406 с.

32. Олейник О.А. Краевые задачи для линейных уравнений эллиптического и параболического типа с разрывными коэффициентами / О.А. Олейник // Изв. АН СССР, сер. матем. - 1961, № 25. - с. 3-20.

33. Олейник О.А. О задаче Стефана. / О. А. Олейник // Первая летняя математическая школа. - Киев. - 1964. - Т.2. с. 183-203.

34. Каменомостская С. Л. О задаче Стефана / С. Л. Каменомостская // Матем. сб. - М., 1961. - т. 53. - №4, с. 489–514.
35. Леонтьев Ю. В. Приближенные численно-аналитические методы решения задач теплопроводности с фазовыми переходами: Дис. канд. физ-мат. наук. – Киев, 1984. – 140 с.
36. Evans G.W. A Note on the Existence of a Solution to a Problem of Stefan.- Quart. Appl. Math., vol.IX, No.2. - 1951.
37. Мейрманов А.М. О классическом решении многомерной задачи Стефана для квазилинейных параболических уравнений // Математ. сборник, т. 112 (154), Ш 2. – 1980. - с. 170-192.
38. Меламед В.Г. Сведение задачи Стефана к системе обыкновенных дифференциальных уравнений // Изв. АН СССР, сер. геофиз. – 1958. - № 7. - с. 848-869.
39. Меламед В.Г. Решение задачи Стефана в случае второй краевой задачи // Вестник МГУ, сер. мат. – 1959. - № I. – с. 499-518.
40. Самойлович Ю.А. О приближенных способах расчета затвердевания отливок // ИФ1. – 1966. - т. II, № 5. - с. 651-657.
41. Данилюк И. И. О смешанной задаче для квазилинейного уравнения теплопроводности с кусочно-разрывными коэффициентами // УМН. - т. 36, № 4. - с. 219-220.
42. Мучник Г.Ф. Методы теории теплообмена, ч. I. Теплопроводность / Г.Ф. Мучник, И.Б. Рубашов. – М.: "Высшая школа". – 1970. - 287 с.
43. Постольник Ю.С. Одномерный конвективный нагрев при зависящем от времени коэффициенте теплообмена // ИФЖ, т.18, № 2. – 1970. - с. 316-322.
44. Леонтьев Ю.В. Об одной математической модели двухфазной зоны кристаллизующегося слитка /Ю.В.Леонтьев // Краевые задачи математической физики. - Киев, Изд-во Института математики АН УССР. - 1978, с. 39-44.

45. Friedman A. Free boundary problems for parabolic equations, Evaporation or condensation of a liquid drop.- J. Math, and Mech., vol.9, No.1, 1960, p.19-66.
46. Friedman A. Remarks on Stefan-type free boundary problems for parabolic equations // J. Math, and Mech., vol.9, No.6. - 1960, p.885-904.
47. Biot M.A., Ganghaday H. Variational Analysis of Ablation.-J. Aerospace science, 1962, vol.29, No.2, p.228-236.
48. Friedman A. Melting of solids.- J. Math, and Mech., vol.8, No.4 1959, p. 499-518.
49. Мажукин В. И. Метод динамической адаптации для численного решения нестационарных многомерных задач Стефана / В. И. Мажукин, А. А. Самарский // Доклады академии наук. – М. – 1999, т. 368, №3. – с. 307-310.
50. Хасанов М.К., Столповский М.В. Численное решение задачи стефана с несколькими границами фазовых переходов методом ловли фронта в узел сетки // Фундаментальные исследования. – 2015, № 11-4. С. 748-752.
51. Самарский А. А. Численные методы. Учебное пособие для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.
52. Самарский А.А. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский - М.: ШТТЛ, 1953, 659 с.
53. Самарский А.А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана / А.А. Самарский, Б.Д. Моисеенко // ЖВМ и Ш.- 1965.- т.5, № 5, с. 816-827.
54. Будак Б.М. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана / Будак Б.М., Соловьева Е.Н., Успенский А.Б. // ЖВМ.- 1965.- т.5, № 5, с. 828-840.
55. Об однородных алгоритмах численного решения задачи Стефана / В.И. Мажукин, Ю.А. Повещенко, С.Б. Попов, Ю.П. Попов. // Препринт Института прикладной математики им. М. В. Келдыша АН СССР. – 1985. - № 122, 23 с.
56. Самарский А. А. Об одном экономичном разностном методе

решения многомерного параболического уравнения в произвольной области / А. А. Самарский // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1962. - № 5, с. 787—811.

57. Самарский А. А. Локально-одномерные разностные схемы на неравномерных сетках / А. А. Самарский // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. - 1963. - № 3, с. 431—466.

58. Павлов А. Р. Решение задачи Стефана сведением ее к задаче теплопроводности с движущимся источником тепла / А. Р. Павлов, Е. А. Слепцова // Математические заметки СВФУ. – 2014. –т.21, №1. – с. 86-94.

59. Королева О. Н. Динамическая адаптация во многофронтных задачах Стефана: Автореф. дис. канд. физ-мат. наук. – М.: ИММ РАН, 2006. – 23с.

60. Мажукин В. И. Кинетика оптического пробоя пара алюминия в широком частотном диапазоне. Современное состояние проблемы / В. И. Мажукин, М. В. Мажукин, П. Бергер // Матем. моделирование. – 2005. - №12, –с. 27-29.

61. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. - М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. - 356 с.

62. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М., 1972 г. - 720 с.

63. Сборник задач по теории горения: Учебное пособие для вузов/ Под ред. В. В. Померанцева – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 152 с.

64. Четверушкин Б. Н. Математическое моделирование задач излучающего газа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 304 с.

65. Вукалович М. П. Термодинамические свойства газов / М. П. Вукалович, В. А. Кириллин, С. А. Ремизов и др. – М.: Машгиз, 1953. – 160 с.

66. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

67. Синярев Г.Б. Жидкостные ракетные двигатели / Г.Б. Синярев, М.В. Добровольский. - М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1955. - 499 с.
68. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике / И. Н. Фридляндер // Вестник российской академии наук. – 2004. – т.74 №12. –с.1076-1081
69. Чигал В. Межкристаллическая коррозия нержавеющей сталей: пер с чеш. под ред. Б. П. Строкана. – М.: Химия, 1969. – 232 с.
70. О теплопроводности меди и ее сплавов [Электронный ресурс] : Met-All.org - Все о металле на одном сайте. URL: <http://met-all.org/cvetmet-splavy/med/teploprovodnost-medi-i-ee-splavov.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 11.04.2018 г.
71. Зусин В. Я. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов / В. Я. Зусин, В. А. Серенко. – Мариуполь, 2004.
72. Разиков М.И. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа. – М.: Машиностроение, 1962. – 212 с.
73. . Летягин И.Ю. Оценка сквозного проплавления при лазерной сварке на основе регистрации плазменного факела / И.Ю. Летягин, Е.М. Федосеева // Вестник ПНИПУ. – Пермь, 2016. - №1.- с. 84-100.
74. Krishtal M.A. The structure and properties of alloys treated with the laser radiation / M.A., Krishtal, A.A. Zhukov, A.N. Kokora. - М.: Metallurgiiа, 1973. 192 p.
75. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц и др; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 663 с.
76. Гибридные технологии лазерной сварки: учебное пособие / А.Г. Григорьянц и др.; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 83 с.
77. ГОСТ 24940-96. Здания и сооружения. Методы измерения освещенности. – М.: ГУП ЦПП, 1997 – 25 с.