

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Численное моделирование воздействия
ультракоротких лазерных импульсов
на твердые и аморфные материалы**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4022 группы

направления 03.03.02 Физика

Института физики

Фролова Артёма Юрьевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, ученая степень, уч. звание

О.А. Черкасова

Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой общей, теоретической и компьютерной физики

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, уч. звание

В.М. Аникин

Инициалы Фамилия

Саратов 2023 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие лазерных технологий дало новую жизнь технической и научной оптики и развитию новых промышленных отраслей. Одной из них является лазерная резка материалов, являющаяся одним из наиболее эффективным и точным методом обработки материалов. Современные лазерные станки обладают высокой точностью и скоростью обработки материалов, а программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс и управлять им удаленно.

Процесс лазерной резки осуществляется с помощью управляемого лазерного луча, который направляется на поверхность материала[2,3]. Лазерный луч нагревает материал до очень высокой температуры, вызывая его расплавление или испарение. Затем высокочастотный газовый поток удаляет расплавленный или испаренный материал, образуя разрез[19,21,22].

Технология лазерной резки используется при обработке и разделении слоистых материалов, композитов, дерева, металла, горных пород, бумаги, полимерных пленок, керамики и пр. Она позволяет создавать сложные геометрические формы и обрабатывать материалы различной толщины и жесткости. Кроме того, лазерная резка обеспечивает чистый и аккуратный разрез без зазубрин и заусенцев[14].

Одним из преимуществ лазерной обработки *твердых материалов* является возможность создания высокоточных и сложных геометрических форм. Кроме того, лазерная обработка позволяет сократить время и стоимость производства за счет уменьшения отходов и увеличения производительности. При лазерной обработке твердых материалов необходимо учитывать их физические свойства – теплопроводность, теплоемкость и коэффициент расширения, поскольку неправильно выбранные параметры лазерной обработки могут привести к деформации и повреждению материала [13,15,23].

Аморфные материалы (к ним принадлежат стекло, полимеры) не имеют регулярной кристаллической структуры, что делает их трудными для обработки традиционными методами. При лазерной обработке *аморфных материалов* лазерный луч нагревает поверхность материала, что приводит к плавлению и испарению. Это позволяет создавать высокоточные структуры и отверстия в материале, а также создавать микроскопические детали и структуры с высокой точностью. Кроме того, лазерная обработка позволяет создавать поверхности с определенной текстурой и формой, что может быть полезно для различных приложений. При лазерной обработке аморфных материалов необходимо учитывать их особенности, такие как низкая теплопроводность и высокая чувствительность к температурным изменениям. Это нужно учитывать при выборе параметров лазерной обработки, чтобы избежать повреждения материала[26,28,29].

Цель выпускной квалификационной работы (ВКР): изучить особенности воздействия лазерных импульсов на твердые (кристаллические) и аморфные

материалы и численно смоделировать процесс воздействия лазерного излучения на эти материалы.

Задачи, которые решаются в работе:

1. Рассмотреть принципы и механизмы воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые и аморфные материалы.
2. Составить математическую модель, которая будет описывать механизм взаимодействия лазера с веществом.
3. Составить алгоритм действий при моделировании.
4. Изучить программный пакет «Comsol Multiphysics»
5. Численно смоделировать воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые и аморфные материалы с помощью «Comsol Multiphysics».

Структура ВКР включает введение, 11 глав, заключение, список использованных источников, включающий 29 наименований. Общий объем ВКР – 67 с., включая 33 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В обзорной части ВКР рассматриваются следующие вопросы:
применение лазеров в промышленности, технике и медицине;
характеристики гауссовых пучков,
преобразование гауссова пучка тонкой линзой,
лазерная резка: преимущества и особенности лазерной резки, виды лазерной резки, параметры качества лазерной резки металлов, виды лазерной резки, технология лазерной резки (испарение, плавление, термохимическое воздействие),
взаимодействие лазерного излучения с кристаллическим веществом,
взаимодействие лазерного излучения с аморфным веществом.

В практической части ВКР решаются задачи численного моделирования воздействия ультракоротких лазерных импульсов:
а) на *алюминий* (кристаллическое вещество),
б) на *карбон* (аморфное вещество).

Средства моделирования. Моделирование производилось в рамках программы COMSOL Multiphysics посредством функций Heat Flux (Тепловой поток) и Deposited Beam power (Нанесенная мощность луча) с мощностью 1 кВт.

В ходе изложения даются подробные инструкции по работе в системе моделирования COMSOL Multiphysics

Результаты моделирования в программе Heat Flux (алюминий)

На рисунке 1 изображено изменение температуры в течение передвижения лазера вдоль алюминиевой пластины вперед и назад с периодом в 20 секунд. Из графика видно, что с каждым периодом температура возрастает на практически равное значение, равное 70 К, из чего можно сделать вывод, что происходит циклический разогрев всей пластины.

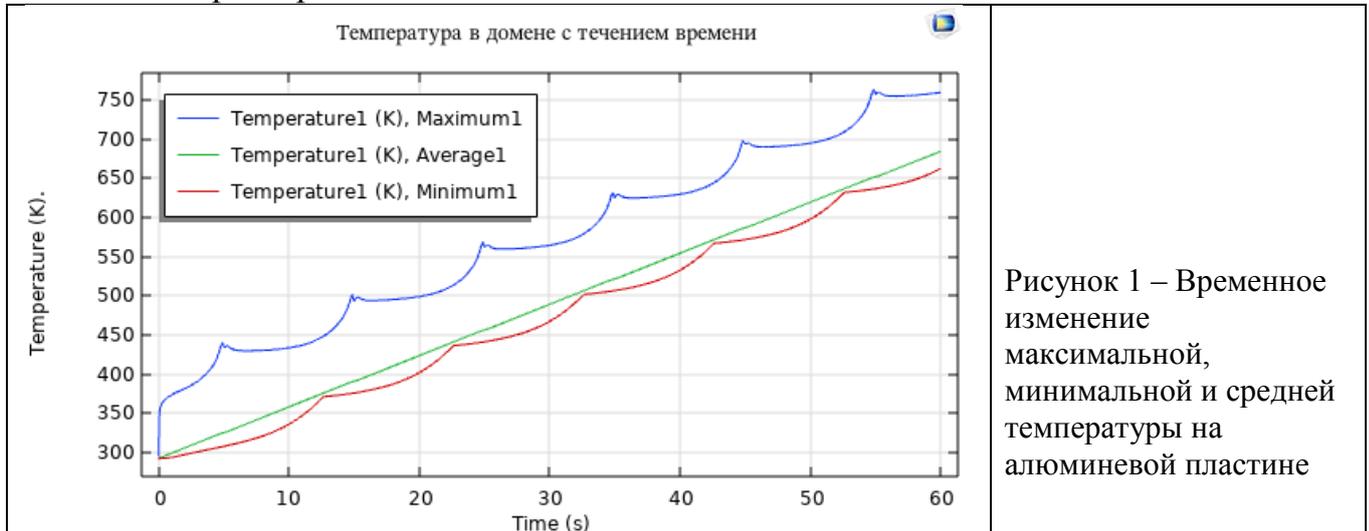


Рисунок 1 – Временное изменение максимальной, минимальной и средней температуры на алюминиевой пластине

Отличие максимальной и минимальной температурами на пластине отражено на рисунке 2. В течение всего нагрева разница температур между периодами не увеличивается, а несколько уменьшается. Скачки разницы температур в свою очередь обусловлены теплоотдачей материала, а так же скоростью прохождения лазером одного периода.

В конечный момент времени температурное поле от лазерного воздействия на поверхности алюминия разогревает его до 750 К (476°C), что не прожигает материал насквозь при заданной толщине в 5 см (рисунок 3). Для получения сквозного реза необходимо увеличить мощность лазерных импульсов.

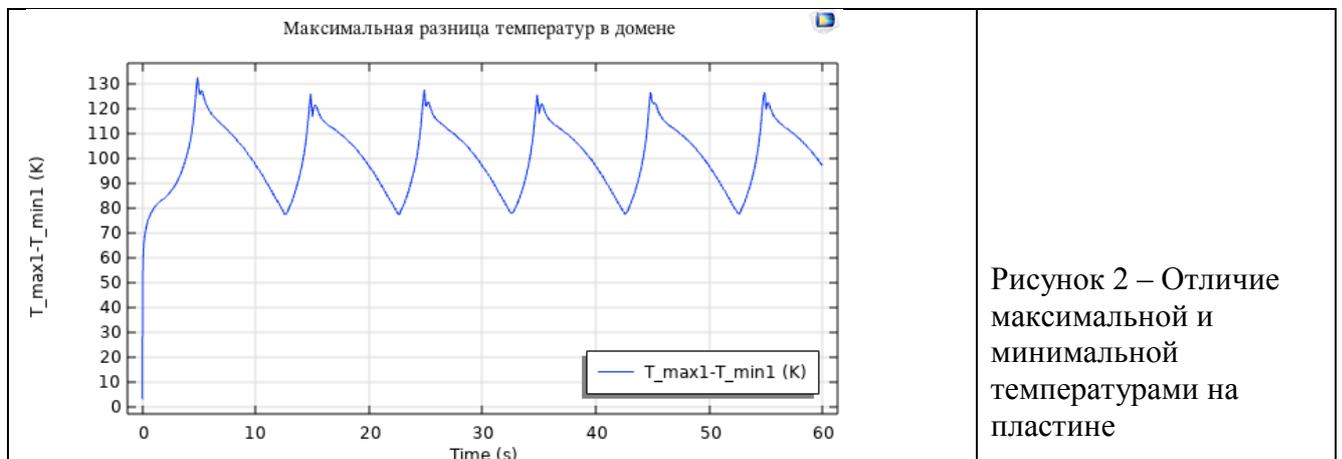


Рисунок 2 – Отличие максимальной и минимальной температурами на пластине

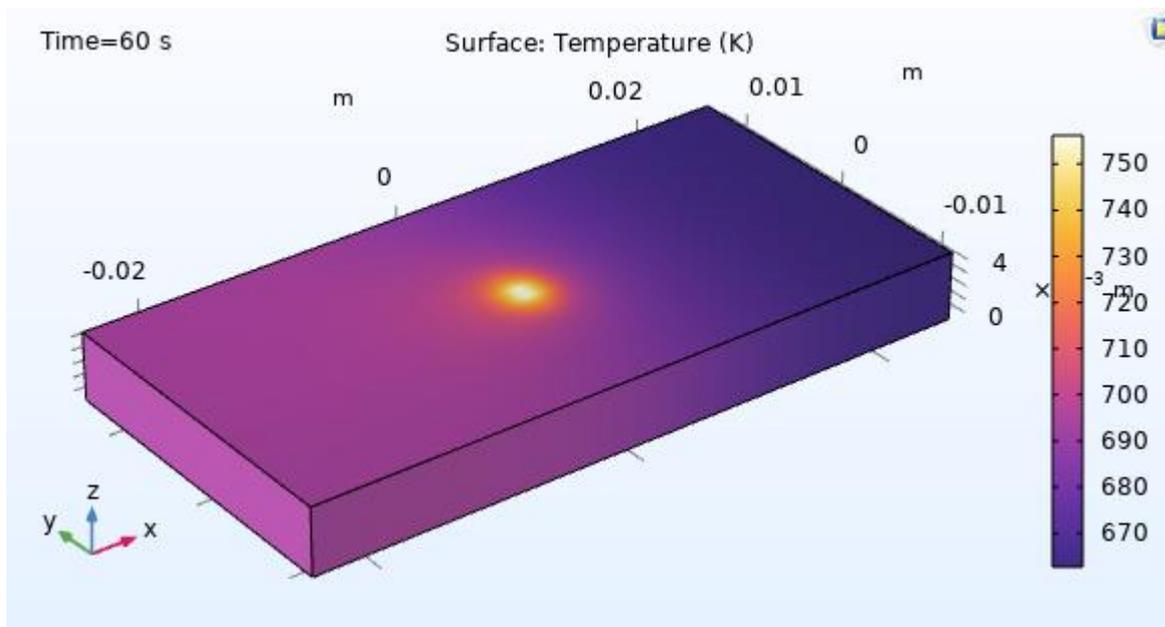


Рисунок 3 - Распределение температуры по всей пластине

Результаты Deposited Beam Power (алюминий)

На рисунке 4 представлено изменение температуры с течением времени. Лазер закреплен неподвижно, нагрев производится в одной точке. Видно, что, начиная с 50 секунды, температура достигает своего максимального значения, которое составляет 5800°K (551°C). Согласно рисунку 5, различие между максимальной и минимальной температурами устанавливается на 5-й секунде, что говорит об установившейся мощности излучения, что отвечает реальности.

Температура в домене с течением времени

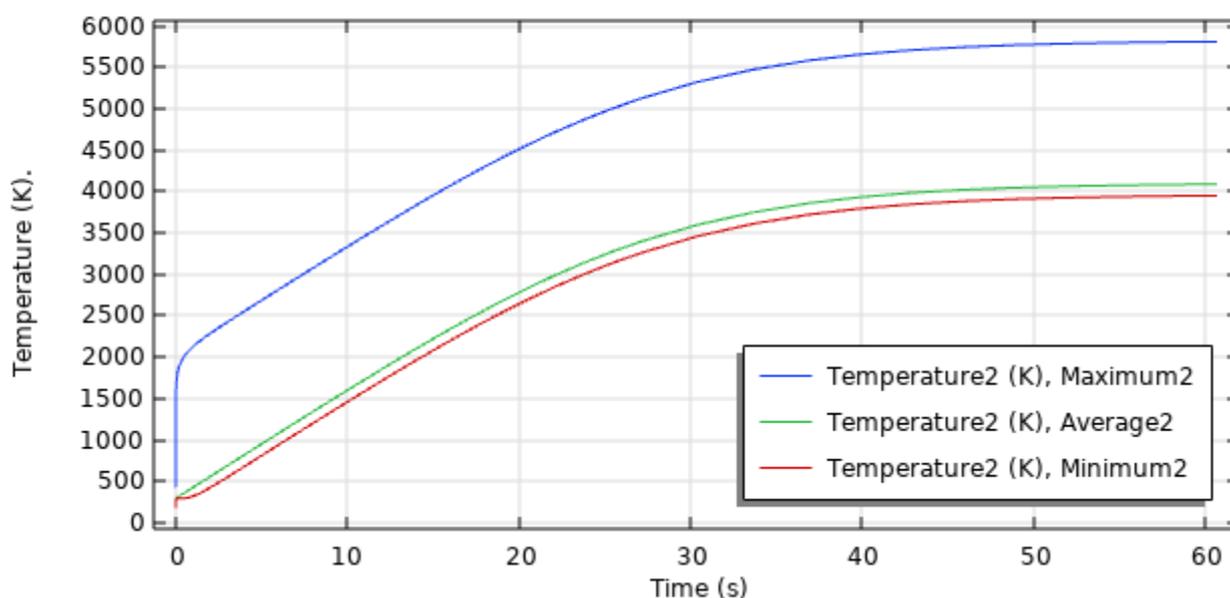


Рисунок 4 – Временное изменение максимальной, минимальной и средней температуры пластины

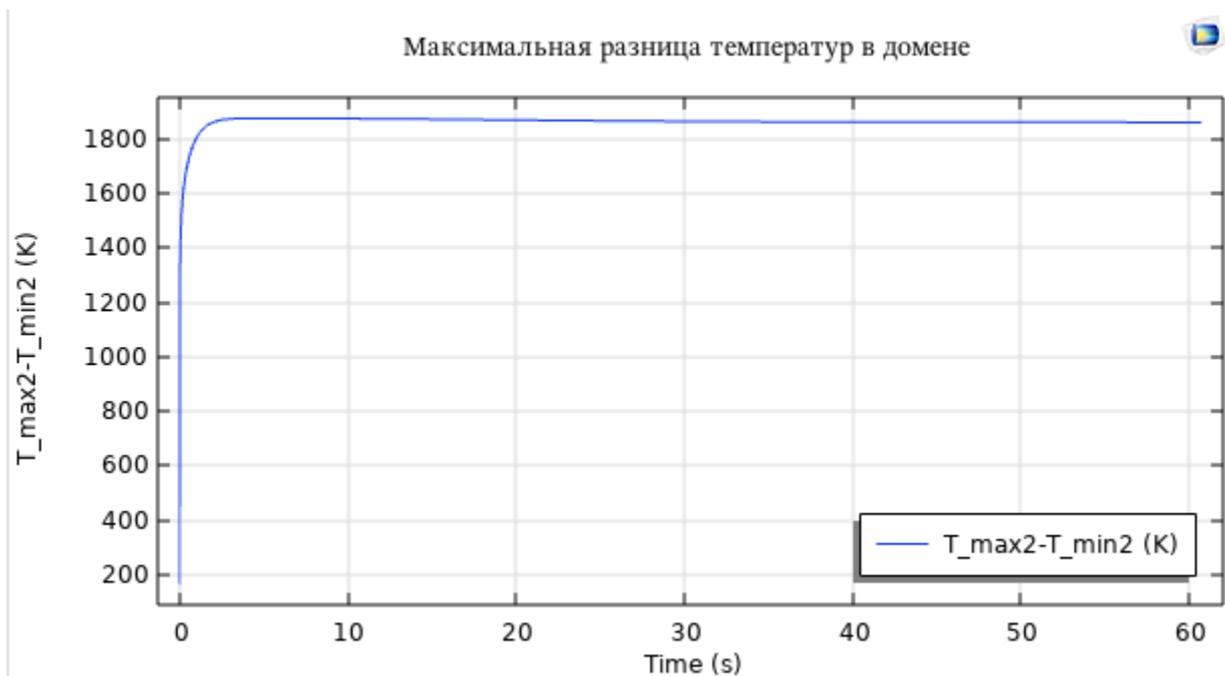


Рисунок 5 – Отличие максимальной и минимальной температур на пластине

На рисунке 6 можно увидеть что в конечный момент времени температурное поле от лазерного воздействия на поверхности алюминия разогревает его до 5600 K(5326°C), в свою очередь температуры плавления и кипения алюминия составляют 933 K(660°C) и 2792 K(2512°C).

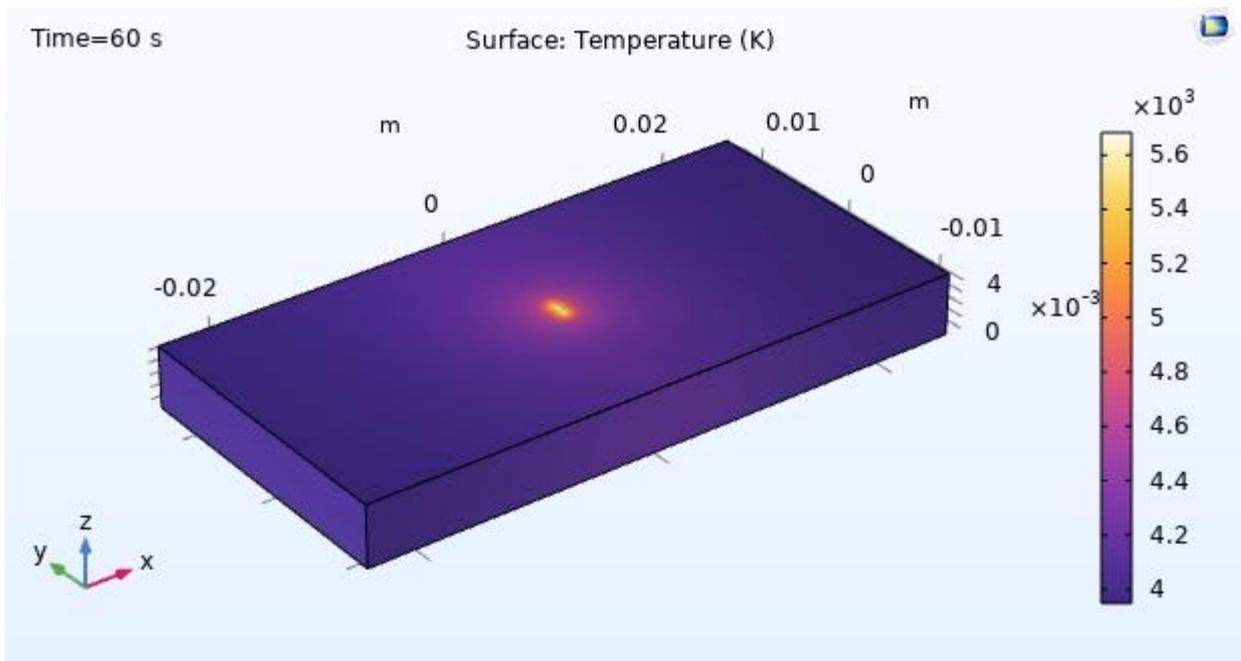


Рисунок 6 – Изменение температуры по всей пластине

При сравнении рисунков 2 и 4 можно заключить, что метод из второго способа лучше использовать для более толстых слоёв материалов, но при понижении мощности можно так же рассматривать этот вариант для обработки

тонких материалов вместе с первым методом. Из графика можно понять, что в первом случае гораздо легче корректировать мощность лазера, что позволит проводить более аккуратную обработку материалов, а при попытке увеличить мощность может быть затрачено большое количество ресурсов что приведет к изменению размеров требуемых отверстий, при этом будут происходить такие процессы как испарение, плавление и выгорание одновременно.

Результаты Heat Flux (карбон)

На рисунке 7 изображен график зависимости температуры в образце от времени, отличающийся от графика рисунке 2, хотя применился один и тот же метод, с теми же самыми настройками. На рисунке 8 отображено отличие максимальных и минимальных температур на пластине. При сравнении с рисунком 3 можно отметить появление второго пика рядом с первым: при нагревании материал перешел из твёрдой фазы в жидкую, вследствие чего произошел разогрев жидкой фазы.

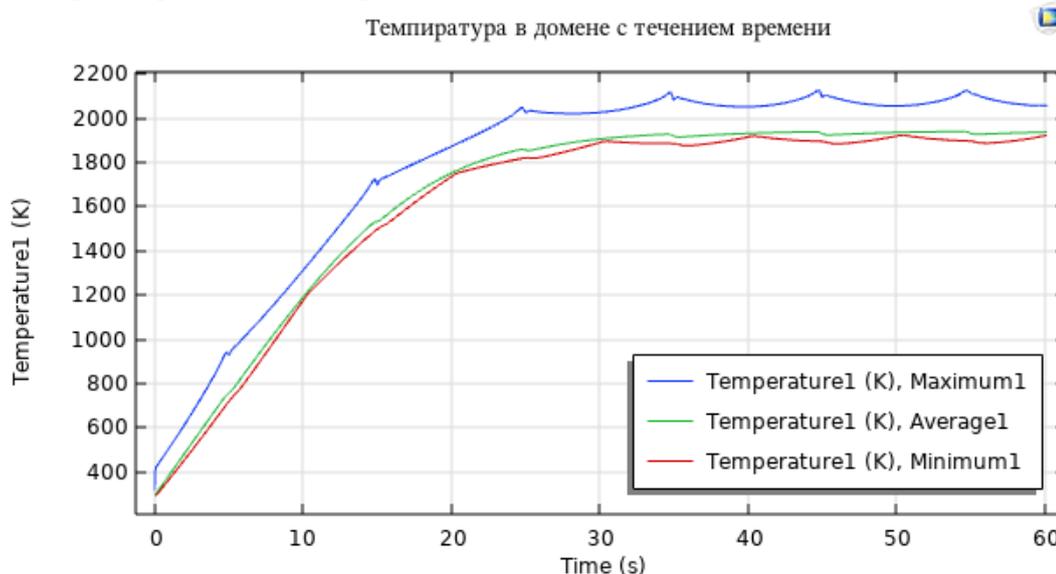


Рисунок 7 – Временное изменение максимальной, минимальной и средней температуры пластины (карбон)

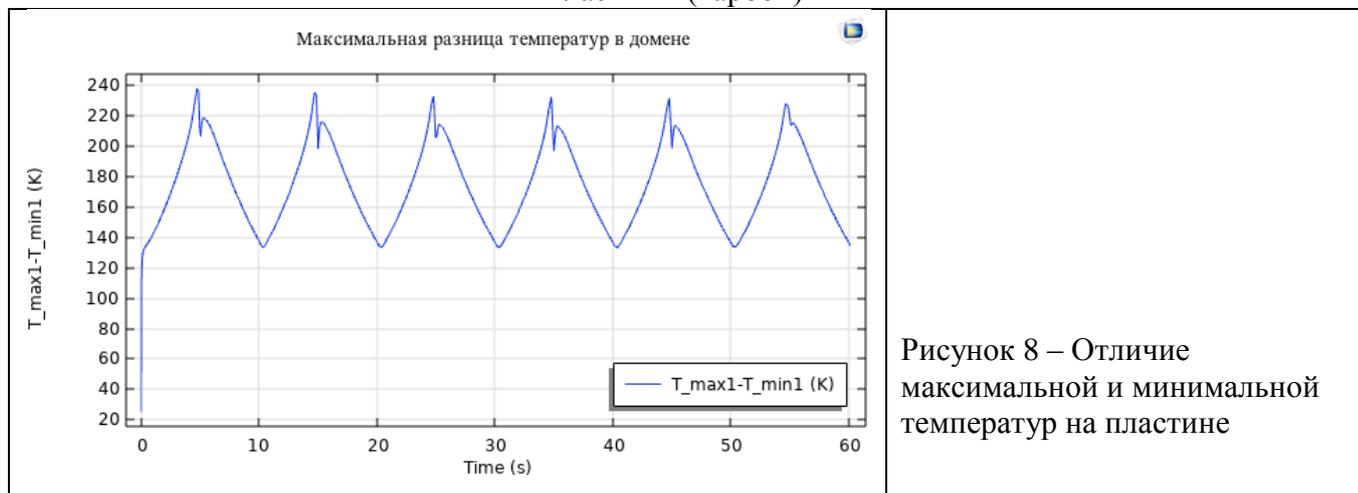


Рисунок 8 – Отличие максимальной и минимальной температуры на пластине

На рисунке 8 можно увидеть что в конечный момент времени температурное поле от лазерного воздействия на поверхности карбона разогревает его до 2400 К(2127°C), в свою очередь температуры плавления и кипения карбона составляют 3273 К(3000°C) и 4473 К(4200°C).

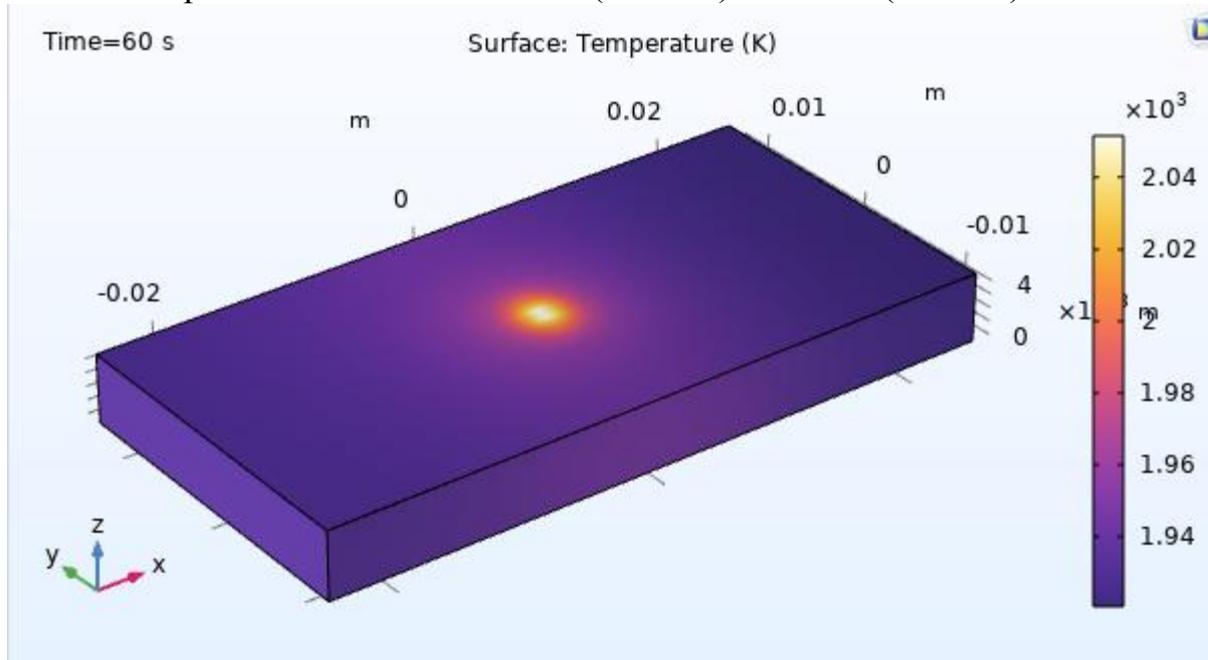


Рисунок 8 – Распределение температуры по всей пластине

Результаты Deposited Beam Power (карбон)

Особенности нагрева пластины из карбона демонстрируют рисунки 9 – 11.

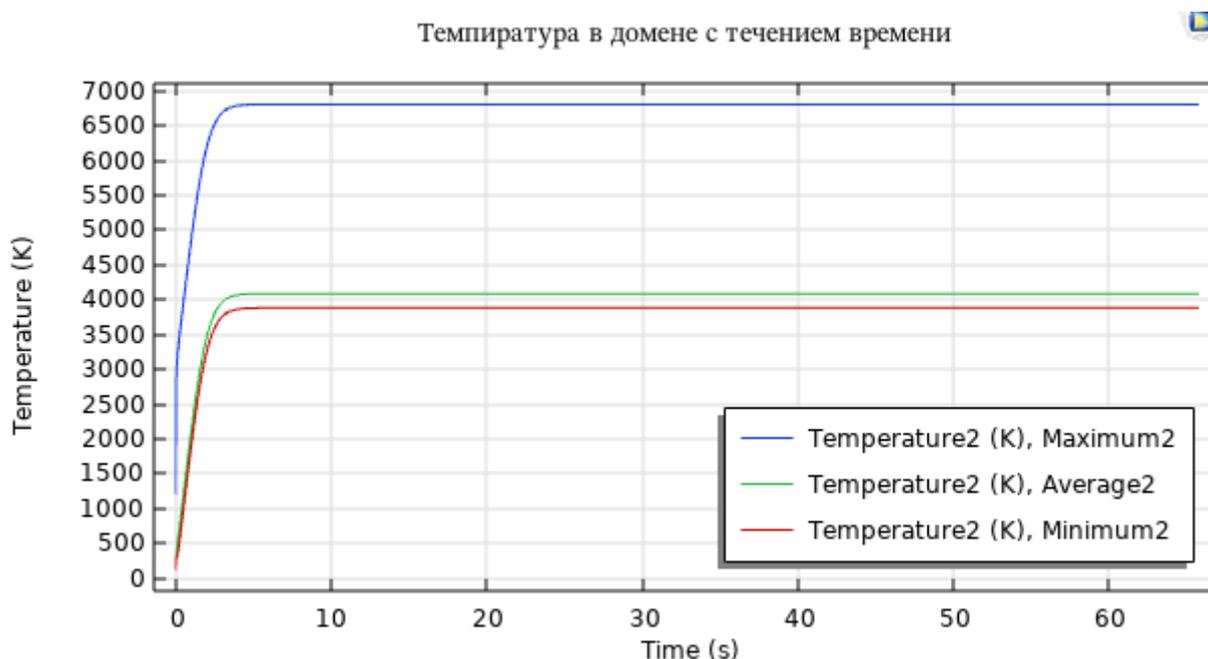


Рисунок 9 – Изменение максимальной, минимальной и средней температуры пластины

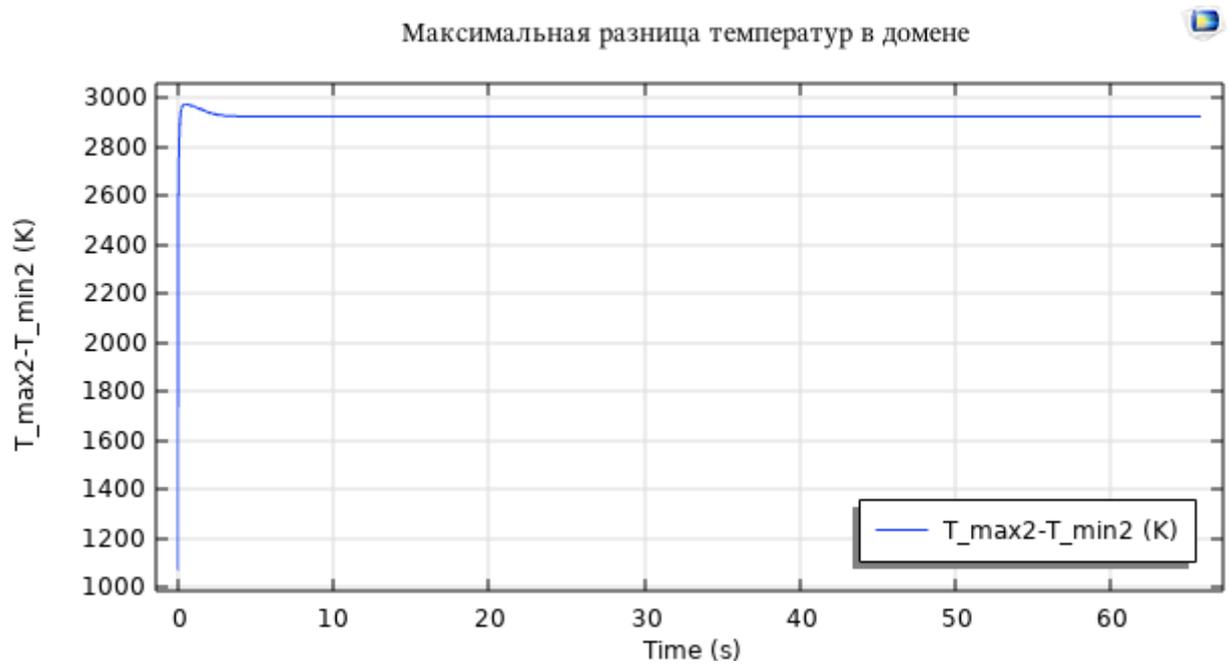


Рисунок 10 – Отличие максимальной и минимальной температур на пластине.

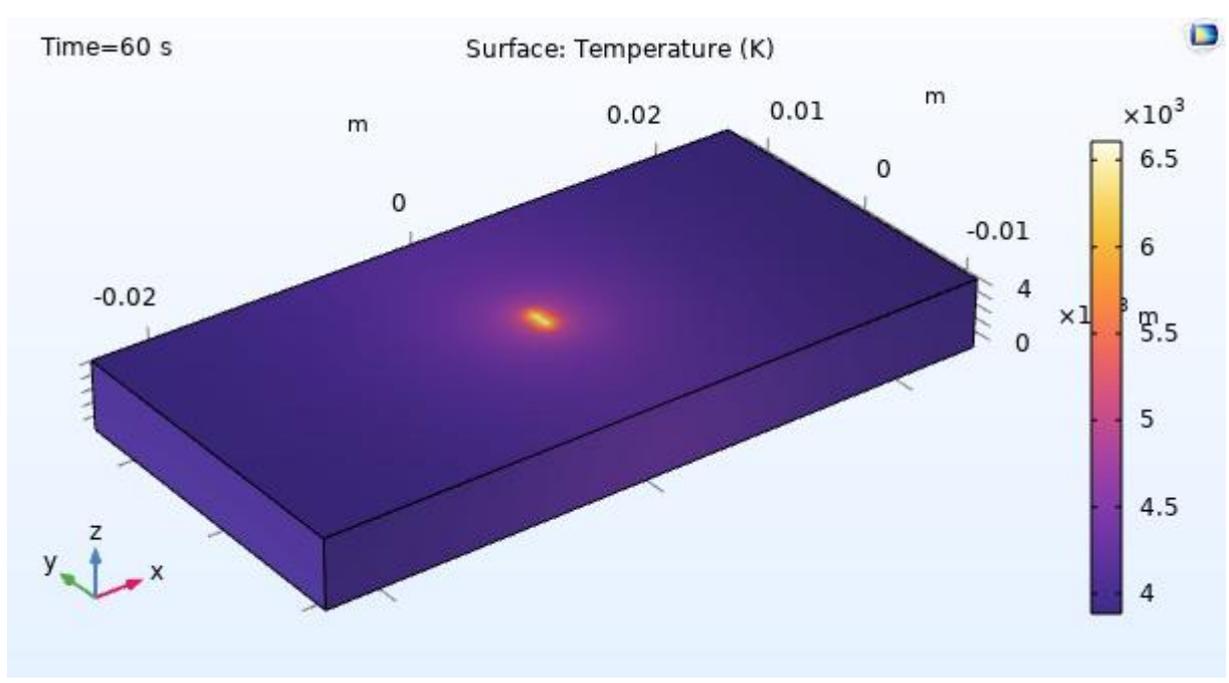


Рисунок 11 – Распределение температуры по всей пластине

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В выпускной квалификационной работе были смоделированы воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые (кристаллические) и аморфные материалы. С помощью встроенных функций программы COMSOL Multiphysics 6.1 были смоделированы процессы плавления и выгорания твердого и аморфного материалов в точке, а также процесс разрезания пластины лазерным пучком путем перемещения лазера вдоль оси x .

Создана математическая модель и компьютерная программа, описывающая изменение интенсивности лазерного излучения в зависимости от расстояния.

Смоделирован процесс воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые и аморфные материалы, получены картины теплового поля и изотермического контура.

Смоделирован процесс перемещения ультракоротких лазерных импульсов по моделям пластин, имитирующий лазерную резку, и получены картины теплового поля моделей.

Сравнительный анализ моделирования воздействия потока ультракоротких импульсов на аморфное и твердое материалы показал согласованность с реалиями.

Использование программного обеспечения для моделирования воздействия лазерного излучения на различные материалы позволят выявить необходимые технологические параметры при поверхностной термической обработке сложных изделий.

Список использованных источников

1. Siegman A.E. Lasers. Mill Valley, California: University Science Books, 1986. 1283 p.
2. Мэтлэнд А., Данн М. Введение в физику лазеров. Москва : Наука, 1978. 408 с.
3. Звелто О. Принципы работы лазеров / пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. СПб : Лань, 2008. 720 с. (Учебные пособия для вузов. Специальная литература).
4. Acland Thomas. Что такое лазер [Электронный ресурс] 2019 // Hitecher : [сайт]. URL: <https://hitecher.com/ru/articles/chto-takoe-lazer> (дата обращения: 15.06.2023).
5. Интернет журнал "ЛАЗЕРНЫЙ МИР" "Что такое лазер? И зачем он нужен?" / Интернет журнал "ЛАЗЕРНЫЙ МИР" [Электронный ресурс] 2015 // Лазерный мир : [сайт]. — URL: <https://лазер.рф/2015/11/19/19/>
6. Виноградов, Б. А., Гавриленко, В. Н., Либенсон, М. Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы. Уч. пособие для ВУЗов. Благовещенск: Изд-во Высшая школа, 1993. 344 с.
7. Китайгородский А. И. Физика для всех: Фотоны и ядра. М.: Наука, 1982. 208 с.
8. Bandres Miguel A., Gutierrez Julio Cesar Vega. Ince Gaussian beams. Optical Society of America, 2004. 309 p.
9. Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 664 с.
10. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. Лекция 8. Гауссовы пучки. С. 71-80. URL : <https://studfile.net/preview/431664/> (дата обращения: 31.05.2023).

11. Распространение Гауссова пучка: понятие перетяжки пучка, глубины фокусировки, качества пучка, расходимости. URL : https://in-science.ru/library/article_post/rasprostranenie-gaussova-puchka
12. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с. (С.173)
13. Глотов А.Н., Голубенко Ю.В., Десяцков В.А., Степанов А.В., Некоторые особенности взаимодействия лазерного излучения с металлами // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2019. С. 32 .
14. Анисимов В.Н., Баранов В.Ю., Большов Л.А. и др. О развитии периодических структур на поверхности металлов и полупроводников под действием излучения импульсного СО2-лазера // ПОВЕРХНОСТЬ: ФИЗИКА, ХИМИЯ, МЕХАНИКА. 1983. №7. С. 138-145.
15. Андрияхин В.М., Майоров В.С., Якунин В.П. О поглощательной способности покрытий для лазерной термообработки черных металлов // Физика и химия обработки материалов. 1984. № 5. С. 89–93.
16. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика. М.: Просвещение, 1998. 254 с.
17. Сивухин В. А. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980. 752 с.
18. Кондиленко И.И., Коротков П.А., Хижняк А.И. Физика лазеров. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. 232с.
19. Захаров Н. С., Урлин В. Д., Шенцев Н. И. Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с веществом. Саров.: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2004. 425 с.
20. Тимченко Е.В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012.144 с.
21. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
22. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов под общей редакцией Вейко В. П.. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. 84 с.
23. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
24. Попов А. В. GNUPLOT и его приложения. М.: Издательство попечительского совета механико-математического факультета МГУ. 2015. 240 с.
25. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. / год ред. проф. А.П.Напартовича. М.: Энергоатомиздат, 1991.544 с.
26. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304с.
27. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов. М.: Высш. шк, 2011. 128 с.
28. Григорьянц А.Г., Соколов А.А.. Лазерная техника и технология :В 7 кн. Кн. 4. Лазерная обработка неметаллических материалов. М.: Высш. шк, 2011. 192 с.
29. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник . М.: Машиностроение, 2009. 496 с.