

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА В  
СТЕРЖНЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ МКЭ

Автореферат

студента 4 курса 331 группы  
направления 03.03.02 - «Физика»  
физического факультета

**САЖНЕВ ВАСИЛИЙ АНДРЕЕВИЧ**

Научный руководитель

канд. ф.-м. н., доцент  
должность, уч. степень, уч. звание  
фамилия

подпись, дата

**О.А.Черкасова**

инициалы,

Заведующий кафедрой

д. ф.-м. н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание  
фамилия

подпись, дата

**В.М. Аникин**

инициалы,

Саратов 2020

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы работы**

Термическая обработка промышленных деталей является неотъемлемой частью металлургии, поэтому задача моделирования данного процесса имеет высокий приоритет в списке задач повышения качества выпуска продукции. В настоящее время существует множество методов выбора режимов для термообработки, но все они, как правило, не учитывают геометрию деталей, а потому режимы, которые разрабатываются и используются на практике чаще всего далеки от оптимальных, а всё это приводит к увеличению энергетических затрат во время термической обработки деталей. При разработке режимов термообработки необходимо учитывать, как неоднородность температурного поля печи, а также неравномерность нагрева различных участков детали – всё это влияет на образование дефектов детали, которые связаны с различными структурными и фазовыми превращениями, и в конечном итоге приводит к бракованным изделиям металлургической (и, кстати говоря, не только металлургической промышленности).

Актуальность данной работы очевидна, поскольку например, при радиационной стимуляции диффузионных процессов в металлических системах, что можно объяснить необходимостью корректного прогнозирования работоспособности готовых изделий, которые эксплуатируются в условиях облучения высокоэнергетическими частицами. Такие исследования позволяют наблюдать процессы взаимодействия различных ионов с материалами и последующим образованием различных дефектов. Одним из доступных методов изучения таких процессов является компьютерное моделирование.

Исследования, проводимые в данной работе, также будут полезны при формировании различных устройств проведения высокотемпературного отжига под высоким давлением.

Термическая обработка металлов и других материалов является обязательным процессом после проведения ионной имплантации или ионно-лучевой обработки деталей, и выбор оптимальных параметров обработки является до сих пор актуальной задачей.

Не утихающий интерес к важности численного моделирования процессов термической обработки деталей. Это изучение кристаллизации металлических сплавов, микротвёрдости металлов, и возможности новых материалов на основе соединений металл – неметалл, поведение материалов при высоком давлении, влияние на структуру, фазовый состав и твёрдость плёнок на поверхности металла и различных сплавов, прочность сварных соединений при проведении термической обработке деталей, множество различных методик для оптимизации процессов отжига.

### **Цель работы**

Провести литературный анализ посвящённой исследуемой теме, а также построить компьютерную модель распространения тепла в стержне сложной формы.

### **Основными задачами проекта являются:**

- предметный анализ исследуемой темы;
- изучить вопросы теплопроводности в различных средах и материалах;
- провести литературный анализ по теории и практике термической обработки металлических деталей;
- изучить программу для компьютерного моделирования ELCUT;
- описать интерфейс изучаемой программы;
- отработать навыки по разработке проектируемых моделей в ELCUT;
- разработать компьютерную модель нагрева стержня в программе ELCUT;
- разработать компьютерную модель нагрева стержня сложной формы в программе ELCUT;

- провести анализ полученных результатов.

## **Структура работы**

Выпускная квалификационная работа представлена на 55 страницах.

Структура работы выглядит следующим образом: введение, 4 главы, заключение. Список использованных источников содержит 43 наименований, в том числе 1 российский патент и 28 статей в периодических изданиях за последние 10 лет. В тексте присутствует 34 рисунка.

## **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи.

**В первой главе** приводится литературный анализ по исследуемой теме.

Теплота может распространяться в любых веществах и даже через вакуум. Идеальных теплоизоляционных материалов не существует.

Во всех материалах теплота передаётся теплопроводностью за счёт переноса энергии микрочастицами. Молекулы, атомы, электроны и другие микрочастицы, из которых состоит материал, движутся со скоростями, пропорциональными их температуре. За счёт взаимодействия друг с другом быстро движущиеся микрочастицы отдают свою энергию более медленным, перенося, таким образом, теплоту из зоны с высокой в зону с низкой температурой.

В жидких и газообразных средах перенос теплоты может осуществляться за счёт теплопроводности и перемещения макроскопических объёмов вещества в зоны с отличными температурами (конвективный

теплообмен). Однако конвективный перенос в жидкостях обычно является определяющим, поскольку он значительно превышает процесс теплопроводности.

В большинстве случаев перенос теплоты осуществляется несколькими способами одновременно (сложный теплообмен), когда необходимо учитывать третью составляющую переноса теплоты – излучение. Излучением теплота передаётся через все лучепрозрачные среды, в том числе и вакуум. Носителями энергии при теплообмене излучением являются фотоны, излучаемые и поглощаемые материалами, участвующие в теплообмене.

**Во второй главе** приводится описание электротермической установки, используемой для проведения термической обработки: её геометрические габариты, тип нагрева, параметры обработки, особенности при проведении процесса отжига, возможности применения в промышленности, а также описаны возможные модификации для её улучшения качества выходных изделий.

Для данной установки в программе ELCUT составлена геометрическая модель используемой электротермической установки для нагрева стержня простой и сложной формы.

Также в этой главе описана математическая модель для проведения численного моделирования процесса термической обработки детали.

Используемая камерная электропечь является общетехнического назначения с рабочей температурой 800 - 1250 °С. служат для осуществления любых процессов термообработки при температурах от 20 до 1250 °С.

Возможны разные исполнения: для работы в воздушной атмосфере или в иных атмосферах (герметичные печи), модификации печей, различающиеся размером камер и других деталей.

Согласно требованиям заказчика возможны изменения в модификации печи:

- в конфигурации камер;
- в мощности (коррекция в большую или меньшую сторону);

- в фазности.

Рисунок 2.1 - Камерная печь СНО-8,5.17.5/10

Стенка печи состоит из термоизоляционного материала – шамотного кирпича, имеющий следующие параметры: теплопроводность  $\lambda=0.95(\text{Вт/К}\cdot\text{м})$ , плотность  $\rho=7800(\text{кг/м}^3)$ , теплоемкость  $C=480(\text{Дж/кг}\cdot\text{К})$ .

Рабочая область печи - воздух: теплопроводность  $\lambda=0.02(\text{Вт/К}\cdot\text{м})$ , плотность  $\rho=1.2(\text{кг/м}^3)$ , теплоемкость  $C=1000(\text{Дж/кг}\cdot\text{К})$ . В качестве нагревательного элемента – нихром: теплопроводность  $\lambda=21(\text{Вт/К}\cdot\text{м})$ , плотность  $\rho=8400(\text{кг/м}^3)$ , теплоемкость  $C=440(\text{Дж/кг}\cdot\text{К})$ . Камерная электропечь СНО-8,5.17.5/10 имеет следующие технические характеристики:

1. максимальная рабочая температура –  $1000^\circ\text{C}$ ;
2. габариты рабочего пространства ( $X\times Z\times Y$ ) –  $850\times 1700\times 500$  мм;
3. объем рабочей камеры – 722,5 литров;
4. установленная мощность, кВт – 40;
5. среда в рабочем пространстве – воздух;
6. фазность печи – трехфазная;

Далее в этой части работы приведена и геометрическая модель электротермической установки.

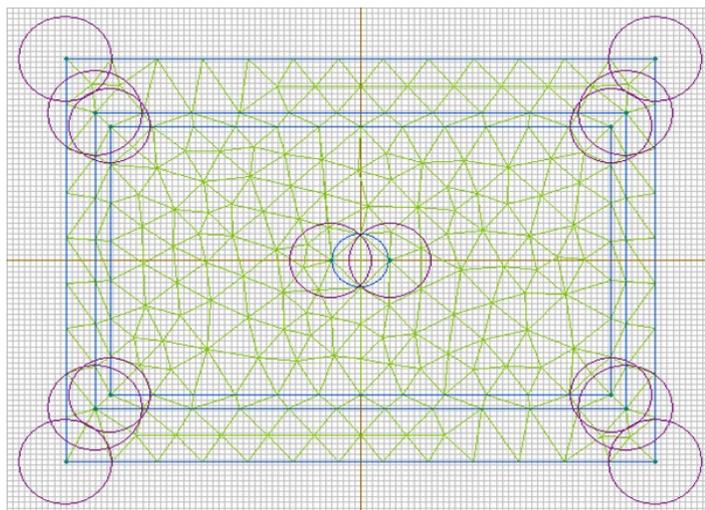


Рисунок 1 - Геометрическая модель электротермической установки, построенной в программе ELCUT

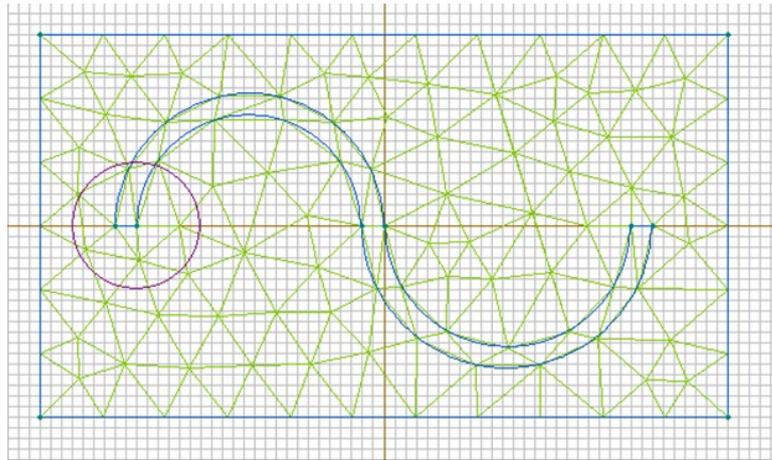


Рисунок 2 - Геометрическая модель стержня сложной формы, построенной в программе ELCUT

**В третьей** части работы мы рассмотрели возможности программы ELCUT, а также описали методику работы в ней. Подробно рассмотрели пользовательский интерфейс данной программы.

**В четвертой** части работы приводятся результаты численного моделирования процесса в электротермической установке для стержня сложной формы.

Приведены результаты нагрева детали в динамике, и представлены визуализации температурных полей в различные моменты времени во время проведения термической обработки.

На рисунках 4 – 10 показаны результаты моделирования в моменты времени: 0с, 200с, 300с, 500с, 1000с и 6000с.

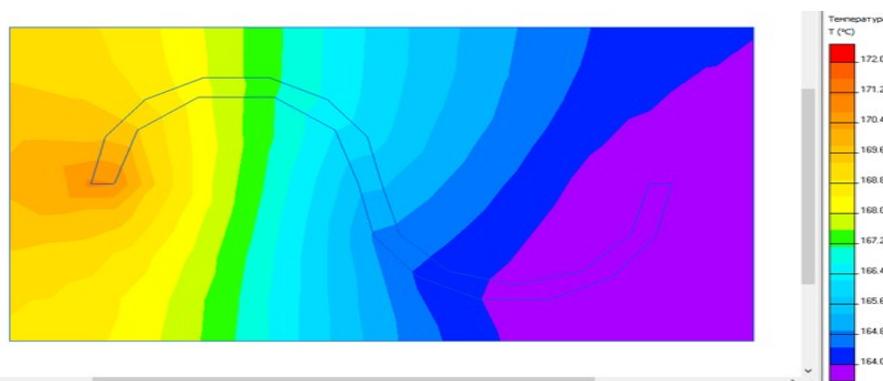


Рисунок 3 – Результат расчёта в программе ELCUT в момент времени 200с

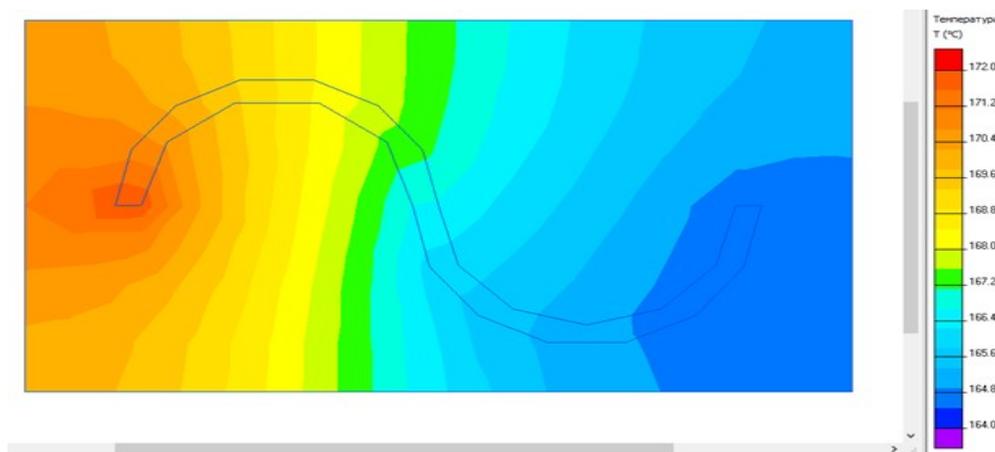


Рисунок 4 – Результат расчёта в программе ELCUT  
в момент времени 6000с

Исходя из представленных графиков, можно сделать вывод, что, как было сказано ранее, процесс теплопередачи в разных областях детали происходит неравномерно, а скорость нагрева уменьшается в переходе от стенок детали к её центру, т.к. внутри объекта нагрев происходит при помощи механизма теплопроводности.

## Заключение

Термическая обработка промышленных изделий является неотъемлемой частью многих технологических процессов, например, в производстве электронных микросхем или же различных металлических изделий, их сплавов и т.п., а потому актуальность изучаемой темы очевидна, что также подтверждается и наличием множества работ по теме термической обработке деталей.

В теоретической части работы мы провели литературный анализ и рассмотрели теоретические вопросы передачи тепла в различных материалах. Известно, что теплота может распространяться в любых веществах и даже через вакуум. Во всех материалах теплота передаётся теплопроводностью за счёт переноса энергии микрочастицами.

В работе описана используемая электротермическая установка для проведения термической обработки. Указали её особенности, геометрические параметры, возможности их модификации, тип нагрева, режимы термической обработки, которая она позволяет проводить, учли её характеристики для построения математической модели.

Для данной установки в программе ELCUT составлена геометрическая модель используемой электротермической установки для нагрева стержня простой и сложной формы.

Также мы описали математическую модель для проведения численного моделирования процесса термической обработки детали.

В работе мы рассмотрели возможности программы ELCUT, а также описали методику работы в ней. Подробно рассмотрен пользовательский интерфейс данной программы.

Также описан процесс проведения численного моделирования термической обработки в электротермической установке для стержней простой и сложной формы.

Показаны результаты нагрева детали в динамике, и представлены визуализации температурных полей в различные моменты времени во время проведения термической обработки.

Исходя из полученных результатов численного моделирования металлических стержней как простой так и сложной формы, можно сделать вывод, что процесс теплопередачи в разных областях детали происходит неравномерно, а скорость нагрева уменьшается в переходе от стенок детали к её центру, т.к. внутри объекта нагрев происходит при помощи механизма теплопроводности.

Данная работа показывает возможность проведения численного моделирования термической обработки изделий с помощью программы для ЭВМ ELCUT, визуализации температурных полей на количественном уровне областей недогрева или перегрева в отдельных частях исследуемого образца, а это в свою очередь, является важным для изделий со сложной

геометрической формой. Методики численного моделирования не только для нагрева, но и охлаждения предоставляют возможность разрабатывать различные режимы термического отжига деталей для печей различного типа и геометрической формы, что может способствовать повышению качества выходных изделий различных областей промышленности.