

**Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Самарский государственный технический университет**

Кафедра общей и лазерной физики

**Расчет распределения температуры, глубины закалки и
скоростей нагрева-охлаждения при обработке материалов КПЭ**

Методические указания по курсовому проектированию

Самара - 2001

Составитель **И. В. Шишковский**
УДК 621.7+621.9

Расчет распределения температуры, глубины закалки и скоростей нагрева - охлаждения при обработке материалов КПЭ.: Метод. указ. по курсов. проект./ Самар. гос. техн. ун-т; Сост. И. В. Шишковский. Самара, 2001, 10 с.

Содержат описательную и справочную части курсового проекта. Составлены в соответствии с программой курса "Теоретические основы обработки материалов концентрированными потоками энергии (КПЭ)" с целью закрепления теоретического материала и развития практических навыков по расчету оптимальных режимов обработки материалов КПЭ.

Методические указания рассчитаны на студентов специальности 12.07 "Машины и технология высокоэффективных процессов обработки"

Библиогр.: 7 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

Цель работы - развитие и закрепление практических навыков по решению тепловых задач при обработке материалов концентрированными потоками энергии (КПЭ) и определения оптимальных параметров такой обработки для реальных материалов.

Предполагается, что студенты знакомы с первой частью курса “Теоретические основы обработки материалов КПЭ” и методами численного программирования на языках высокого уровня - BASIC, FORTRAN, PASCAL.

Пример задания на курсовое проектирование

1. Тема проекта и исходные данные. *Разработать и реализовать технологическую программу расчета температурного поля на стадии охлаждения и определить закалочные скорости в стали ХВГ.*

2. Задание на специальную разработку. *Обработка ведется импульсным Nd-YAG лазером. Энергия в импульсе 6 Дж, длительность импульса лазерного излучения (ЛИ) была 1 мс. Размер пятна ЛИ - 0,4 см. Коэффициент поглощения ЛИ $A=0,3$. Размеры образца (30x55x45) мм.*

3. Содержание расчетно-пояснительной записи (перечень подлежащих разработке вопросов). *Описать используемый в курсовой работе метод расчета с обоснованием его выбора и исходя из указанных параметров лазерной обработки.*

4. Перечень обязательного графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): *а) лист с блок-схемой проведения расчетов; б) лист с компьютерной программой расчета на одном из известных вам языков программирования (PASCAL, FORTRAN, BASIC и т.п.).*

План работы

Анализ исходных данных и выбор метода расчета. Расчет температурных режимов обработки материалов КПЭ необходимо начинать с анализа конкретного материала, указанного в задании, и его теплофизических характеристик. Например, в задании № 19 указана сталь ХВГ. Следовательно, необходимо обратиться к справочной литературе [1-3] для выяснения таких теплофизических

характеристик этой стали, как плотность, теплопроводность, теплоемкость именно для того интервала температур, где необходимо проводить расчет. В нашем случае в задании отмечено, что надо рассчитать температуры на стадии охлаждения материала после обработки импульсным ЛИ и определить закалочные скорости. Из [1] мы определяем, что сталь ХВГ имеет $A_{c1} = 750$ °С, $A_{c3} = 940$ °С, $M_n = 210$ °С. Тогда в этом интервале температур плотность стали $\rho = 7,66$ г/см³ и определяется интерполяцией по приведенным в справочнике значениям плотности для 20, 300, 600 °С. Теплоемкость этой стали из [2] $c = 0,218$ кал/г*град, а вот теплопроводность для этой марки стали не приведена. Тогда необходимо вспомнить, что данная сталь относится к классу инструментальных легированных сталей типа 9Х1, 9ХС, 9ХВГ, ХВГС и т.п. В частности, для марки 9Х1 в [2] приведена цифра $\lambda = 0,07$ кал/см*с*град.

Следующим этапом является оценка размерности задачи. Для этого необходимо сопоставить размер пятна лазерного воздействия (ЛВ) (у нас он равен 0,4 см) с величиной зоны теплового влияния (ЗТВ) $D \sim \sqrt{a * t}$, которая ~ 64.7 мкм, т.е. “ τ_p ”. Величину D также следует сравнить с размерами образца. В нашем случае расчет показывает, что тепловая задача может быть одномерной, так как размеры образца много больше ЗТВ, а значит достаточно вычислить распределение температуры только вглубь материала.

Описание метода расчета и самого решения. Из проведенного анализа исходных данных следует, что для нахождения распределения температуры по глубине ЗТВ можно воспользоваться методом интегральных преобразований Фурье (ИПФ) (см. метод. указания “Решение уравнения теплопроводности при обработке КПЭ методом интегрального преобразования Фурье”, Самара, 1997 или [4,5]). В частности, в методических указаниях, как пример, разобрана подробно постановка и решение нашей задачи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= a * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 \leq x < \infty, 0 \leq t \leq \tau_{ин}. \\ -\lambda \frac{\partial T(x=0, t)}{\partial x} &= AI_0, T(x, t=0) = \\ &= T(x \rightarrow \infty, t) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Следовательно, сославшись на литературу и используемый метод, само решение нужно воспроизвести в курсовом проекте:

$$T(x, t) = \frac{2AI_0 \sqrt{a\tau_{\text{л}}}}{\lambda} * \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{л}}}}\right). \quad (2)$$

Однако, в задании требуется рассчитать температуры на стадии охлаждения, т.е. решение тепловой задачи нужно продолжить и тем же методом ИПФ решить тепловую задачу (3) на стадии охлаждения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 \leq x < \infty, \tau_{\text{л}} \leq t \leq \infty.$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x=0, t)}{\partial x} = 0, T(x \rightarrow \infty, t) = 0, \quad (3)$$

$$T(x, t = \tau_{\text{л}}) = \frac{2AI_0 \sqrt{a\tau_{\text{л}}}}{\lambda} * \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{л}}}}\right).$$

Из постановки задачи видно, что теперь поверхностный лазерный источник равен нулю, а начальное условие тождественно равно распределению температуры в момент окончания лазерного импульса. Можно показать, что тогда решение на стадии охлаждения будет иметь симметричный с нагревом вид.

$$T(x, t) = \frac{2AI_0}{\lambda} * \left[\begin{array}{l} \sqrt{a\tau_{\text{л}}} * \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{л}}}}\right) - \\ - \sqrt{a(t - \tau_{\text{л}})} * \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t - \tau_{\text{л}})}}\right) \end{array} \right]. \quad (4)$$

Очевидно, что скорости охлаждения можно найти простым дифференцированием решения (4) по времени:

$$v(x, t) = \frac{AI_0}{\lambda} * \left[\begin{array}{l} \sqrt{\frac{a}{\tau_{\text{л}}}} * \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{л}}}}\right) + \frac{x}{2\tau_{\text{л}}} * \\ + \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{л}}}}\right) - \sqrt{\frac{a}{(t - \tau_{\text{л}})}} * \\ + \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t - \tau_{\text{л}})}}\right) - \\ - \frac{x}{2(t - \tau_{\text{л}})} * \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t - \tau_{\text{л}})}}\right) \end{array} \right]. \quad (5)$$

Уравнения (4,5) полностью описывают аналитическое решение 3-го пункта технического задания.

Замечание 1. Если ЗТВ - D сравнима или больше $r_{\text{л}}$, то в этом случае

рекомендуется решать двух-, трехмерную тепловую задачу. Если D сравнимо или больше размеров обрабатываемой детали, следует воспользоваться преобразованием Фурье в виде ряда.

Замечание 2. В тех случаях, когда решение задачи получено аналитически в виде интеграла, взять который “в лоб” не представляется возможным, рекомендуется сам интеграл брать численно [6]. Наконец, во многих случаях (например, задачи о температуре в двухслойных пластинах, подвергнутых ЛВ или ЭП) представляется разумным решать тепловую задачу сразу численным методом конечных разностей (см. курс лекций “Теоретические основы обработки материалов КПЭ” или [6]).

Общая блок-схема расчетной программы. Блок-схема программы представляет собой структурный план, в соответствии с которым будет осуществляться расчет требуемых в техническом задании параметров (распределение температуры, определение глубины закалки, нахождение скоростей нагрева или охлаждения при обработке КПЭ).

В нашем случае задания № 19 расчет довольно прост, поскольку нам удалось получить решение тепловой задачи в виде конечных формул (4), (5) запрограммировать которые и необходимо. Вообще вид нашего решения позволяет находить температуру и скорость охлаждения в любой точке по глубине образца и любой момент времени после окончания ЛВ. Однако очевидно, что нет нужды рассчитывать температуру материала на таких глубинах и в те моменты времени, где она сравнима с начальной $T_0 = 0$ °С. Практически вычисления можно прервать для глубин, где на стадии нагрева $T \sim A_{c1}$, поскольку ниже этих областей закалки не будет. Аналогично при определении закалочных скоростей и сопоставлении их с критическими ($\sim 200-300$ °С/с) имеет смысл проводить расчет там, где при охлаждении $T > M_n$. В Приложении 1 представлен примерный вид блок-схемы, на основании которой может быть построена программа расчета на каком-либо языке программирования высокого уровня - BASIC, FORTRAN, PASCAL. Для наглядности блок-схему следует развернуть, т.е. описать или указать конкретную ссылку на подпрограммы расчетов отдельных этапов технического задания. Например, подпрограммы численного расчета интегралов, дифференцирования функции, линейной интерполяции можно найти в [6]. При численном расчете важным моментом является также его

точность и устойчивость выбранной схемы вычисления. Оценка точности должна быть представлена в виде формулы [6] и подсчитана. В нашем случае уравнения (4,5) получены точно, а значит и ошибка вычисления отсутствует (в этом и состоит значительное преимущество аналитического метода решения задач).

Программа на языке программирования. В приложении 2 представлен листинг программы расчета температуры и скорости охлаждения в соответствии с техническим заданием №19, уравнениями (4,5) и блок-схемой на языке Паскаль [7]. Комментарии на листинге указывают основные этапы вычислительного процесса. Результаты расчета записываются в файл - Results.dat.

Приложение 2.

```
program m2crw;
{Программа расчета температуры и скорости охлаждения для стали
ХВГ подвергнутой лазерному воздействию}
uses Ish_Num;
label 3;
{Ввод исходных параметров}
const A=0.3; {коэффициент поглощения ЛИ}
      Rb=0.2; {радиус пятна ЛВ/(см)}
      I0=6.0; {Энергия в импульсе/(ДЖ)}
      Td=1.0e-3; {Длительность ЛВ/(с)}
      d=0.3; l=0.55; h=0.45; {размеры образца/(см)}
      C=0.218; {теплоемкость стали ХВГ/(кал/г*град)}
      Hd=0.07; {теплопроводность стали ХВГ/(кал/с*град*см)}
      R0=7.66; {плотность стали ХВГ/(г/см3)}
      Ac1=720.0; Ac3=940.0; Mn=210.0; {реперные температуры стали
ХВГ/(град)}
      Pi=3.1415;
var x,t,s1,s2,tmp,speed,ah,s      :real;
    fp1                          :text;
    {имя файла для записи результатов расчета}

{Подпрограмма расчета интеграла дополнительной функции ошибок}
function ierfc(Uu:real):real;
begin
ierfc:=exp(-sqr(Uu))/sqr(Pi)-Uu*erfc(Uu);
```

```
end; {ierfc}
```

```
{Подпрограмма расчета температуры на стадии охлаждения  
/уравнение 4/}
```

```
function Tempr(Xu,Tu:real):real;
```

```
label 1;
```

```
var e1,e2,e3 :real;
```

```
begin
```

```
e1:=0.5*Xu/s2;
```

```
if Tu=Td then begin
```

```
    Tempr:=2.0*s1*s2*ierfc(e1); goto 1; end;
```

```
e2:=sqrt(ah*(Tu-Td)); e3:=0.5*Xu/e2;
```

```
Tempr:=2.0*s1*(s2*ierfc(e1)-e2*ierfc(e3));
```

```
1:end;{Tempr}
```

```
{Подпрограмма расчета скоростей охлаждения /уравнение 5/}
```

```
function Vel(Xu,Tu:real):real;
```

```
label 2;
```

```
var w1,w2,w3,w4,w5,w6,w7 :real;
```

```
begin
```

```
w1:=sqrt(ah/Td); w2:=0.5*Xu/s2; w3:=0.5*Xu/Td;
```

```
if Tu=Td then begin
```

```
    Vel:=s1*(w1*ierfc(w2)+w3*erfc(w2)); goto 2; end;
```

```
w4:=sqrt(ah/(Tu-Td)); w5:=0.5*Xu/(Tu-Td); w6:=sqrt(ah*(Tu-Td));
```

```
w7:=0.5*Xu/w6;
```

```
Vel:=s1*(w1*ierfc(w2)+w3*erfc(w2)-w4*ierfc(w7)-w5*erfc(w7));
```

```
2:end; {Vel}
```

```
Begin {Основная программа}
```

```
Writeln('Simulation of the one dimensional heat-field from the');
```

```
Writeln('normal impulse laser beam laser beam and cooling velocities');
```

```
Writeln('on the cooling stage in the steel');
```

```
Assign(fp1,'Rezalts.dat'); Rewrite(fp1);
```

```
{Открывается файл записи результатов расчета}
```

```
s:=Pi*sqr(Rb); s1:=A*I0/(Td*s*Hd*4.18); ah:=Hd/(R0*c);
```

```
s2:=sqrt(ah*Td);
```

```
    x:=0.0;
```

```
    while x<=h do {Цикл по пространственной координате X}
```

```
    begin
```

```
t:=Td;
  repeat {Цикл по временной координате T}
tmp:=Tempr(x,t);
speed:=Vel(x,t);
Writeln(fp1,x:12,t:12,tmp:12,speed:12); {Запись в файл результатов}
  if abs(speed)<200.0 then goto 3;
  t:=t+Td; {Шаг по временной координате задан равным длит-ти ЛВ}
  until tmp<=Mn;
  3:x:=x+1.e-3; {Шаг по координате X задан равным 10 мкм}
  end;{по X}
Close(fp1);
end.
```

Приложение 1.

Ввод исходных данных:

- теплопроводность $-H_d$;
- теплоемкость $-C$;
- плотность $-R_0$;
- размеры образца $-d, l, h$;
- энергия в импульсе I_0 ;
- размер пятна ЛВ $-R_b$;
- длительность ЛВ $-T_d$;
- коэффициент поглощения $-A$;
- реперные точки стали ХВГ- A_{c1}, A_{c3}, M_n .

Ц И К Л П О Х И Т

$0 \leq x \leq h,$
 $T_d \leq t \Rightarrow \infty.$

Подпрограмма вычисления температуры $T(x, t)$ на стадии охлаждения (уравнение 4)

Подпрограмма вычисления скоростей охлаждения $v(x, t)$ (уравнение 5)

Запись результатов в файл или вывод на печать

If $x > h$ or
 $T(x, t) < A_{c1}$

Конец программы

Библиографический список

1. Марочник сталей и сплавов: Справочник/ Под ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
2. Таблицы физических величин: Справочник/ Под ред. И. К. Кикоина М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
3. Свойства элементов: В 2 ч. Ч. 1. Физические свойства: Справочник/ Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
4. *Б. М. Будаков, А. А. Самарский, М. Н. Тихонов.* Сборник задач по математической физике. М.: Наука, 1972.
5. Лазерная и электролучевая обработка материалов: Справ-к/ Под ред. Н. Н. Рыкалина и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
6. *Б. П. Демидович, И. А. Марон.* Основы вычислительной математики. М.: Наука. 1966.
7. *Форсайт Р.* Паскаль для всех.: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.

Расчет распределения температуры, глубины закалки и скоростей нагрева - охлаждения при обработке материалов КПЭ

Составитель **Шишковский Игорь Владимирович**

Редактор **С. И. Костерина**

Технический редактор **Г.Н. Шанькова**

Подписано в печать 10 .06.97.

Формат 60x84 1/16. Бум.типогр. N2.

Печать офсетная

Усл.п.л. 0,7. Уч.-изд.л. 0,7.Усл.кр.-отг. 0,6

Тираж 20 экз. С. -

Самарский государственный технический университет
443010, Самара, ул. Галактионовская 141.