

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ STAR-CD

© 2008 С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведены расчеты температурных полей в программном комплексе STAR-CD для технологического объекта из конструкционного материала – листового низколегированного титанового сплава ОТ4-1. Проведенные исследования показали, что результаты расчета температурных полей в программном комплексе STAR-CD в листовом низколегированном титановом сплаве ОТ4-1 при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии удовлетворительно (погрешность не превышает 15...20%) коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Это позволяет сделать вывод о применимости программного комплекса STAR-CD для расчета температурных полей в конструкционных материалах.

Теоретическое и экспериментальное изучение тепловых процессов в зоне энергетического воздействия позволяет выделить общие закономерности и определить основные направления совершенствования технологических процессов [1]. Требуемые свойства материала при воздействии лазерного излучения создаются соответствующим изменением теплового состояния точек объема тела. Характер тепловых процессов определяется параметрами воздействия: плотностью мощности, временем воздействия, геометрическими параметрами зоны обработки и распределением энергии по сечению пучка. Сформулировать основные требования к источнику излучения для осуществления оптимальных высокоэффективных режимов позволяет теоретическое прогнозирование тепловых процессов [2]. Приближенные аналитические решения известных систем дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями могут использоваться в относительно простых схематизированных моделях для проведения качественного и приближенного количественного анализа тепловых явлений. Возрастающие возможности вычислительных средств обуславливают широкое применение численных методов решения нестационарных трехмерных задач нелинейной теплопроводности.

При обработке изделий лазерным излучением характерны большие градиенты температур, смещение точек структурных и фа-

зовых переходов, изменение в процессе обработки оптических и теплофизических свойств материалов. Принятая для расчетов температурных полей схема нагрева представлена на рис. 1. На рис. 1 обозначено: H_1 , H_2 – ширина и толщина исследуемого объекта соответственно.

При расчете температурных полей целесообразно использовать программный комплекс STAR-CD, который рассчитан на применение в рамках интегрированной САЕ среды и предназначается для исследований, проектирования, разработки и оптимизации задач, связанных с моделированием течения жидкостей и газов, термодинамических явлений, а также для расчета температурных процессов. Для численного решения задач в STAR-CD реализован метод контрольного

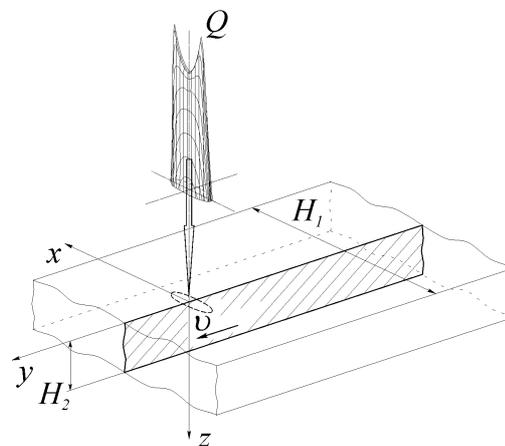


Рис. 1. Схема расчета температурных полей при лазерной обработке в декартовой системе координат

(x , y , z)

объема. Одним из важных свойств этого метода, подробно рассмотренного в работах [3, 4], является точное интегральное сохранение величины энергии на всей расчетной области при любом минимальном числе узловых точек. Это позволяет значительно ускорить расчеты при экономии ресурсов памяти персонального компьютера. Для расчета температурных полей в программном комплексе STAR-CD используется уравнение сохранения энтальпии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U h + F_{h,x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V h + F_{h,y}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W h + F_{h,z}) = \frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial y} + \\ & + W \frac{\partial P}{\partial z} + \tau_{11} \frac{\partial U}{\partial x} + \tau_{12} \frac{\partial U}{\partial y} + \tau_{13} \frac{\partial U}{\partial z} + \\ & + \tau_{21} \frac{\partial V}{\partial x} + \tau_{22} \frac{\partial V}{\partial y} + \tau_{23} \frac{\partial V}{\partial z} + \tau_{31} \frac{\partial W}{\partial x} + \\ & + \tau_{32} \frac{\partial W}{\partial y} + \tau_{33} \frac{\partial W}{\partial z} + S_h \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность; h – термическая энтальпия; t – время; U, V, W – значения скоростей в направлении x, y, z соответственно; $F_{h,x}, F_{h,y}, F_{h,z}$ – поток диффузной энергии в направлении x, y, z соответственно; P – давление; τ – тензор напряжений; S_h – источник энергии (величина, учитывающая подвод и отвод энергии).

Для схемы, представленной на рис. 1, уравнение сохранения энтальпии (1) примет вид:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V h + F_{h,y}) + \frac{\partial F_{h,x}}{\partial x} + \frac{\partial F_{h,z}}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$F_{h,x} = -k \frac{\partial T}{\partial x}; F_{h,y} = -k \frac{\partial T}{\partial y}; F_{h,z} = -k \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопроводности; T – температура.

$$h = c_p T - c_p^0 T_0, \quad (4)$$

где T – температура; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении для температуры T ; c_p^0 – удельная теплоемкость при постоянном давлении для начальной температуры T_0 ;

Подставив значения выражений (3) и (4) в уравнение (2) получим уравнение математической модели тепловой задачи при лазерной обработке в неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ & - c_p(T) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Проведем расчет температурного поля в пакете STAR-CD для технологического объекта из конструкционного материала? листового низколегированного титанового сплава OT4-1 (160Ч100Ч2 мм), который перемещается с постоянной скоростью $v = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м/с в положительном направлении оси Oy в системе координат (x, y, z) , помещенной в центр энергетического источника, описываемого функцией:

$$\begin{aligned} q(x, y) = q_0 & (-2,4568 \cdot 10^{-7} x^{-10} + \\ & + 2,5128 \cdot 10^{-5} x^{-8} - 7,7806 \cdot 10^{-4} x^{-6} + \\ & + 6,8237 \cdot 10^{-3} x^{-4} - 1,7760 \cdot 10^{-2} x^{-2} + \\ & + 1,0142) \cdot (-1,0086 y^{-6} + 2,7886 y^{-4} - \\ & - 2,7350 y^{-2} + 0,9967) \text{ [Вт/м}^2 \text{]} \end{aligned} \quad (6)$$

при $q_0 = 4,1884 \cdot 10^7$ Вт/м²;
 $x \in [-5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$;
 $y \in [-10^{-3} \text{ м}; 10^{-3} \text{ м}]$,

а также энергетического источника, описываемого функцией:

$$\begin{aligned} q(x, y) = q_0 & (1,1513 \cdot 10^{-7} x^{-10} - \\ & - 1,0036 \cdot 10^{-5} x^{-8} + 2,4962 \cdot 10^{-4} x^{-6} - \\ & - 2,0921 \cdot 10^{-3} x^{-4} + 8,2705 \cdot 10^{-3} x^{-2} + \\ & + 0,9969) \cdot (-1,3516 y^{-6} + 3,3895 y^{-4} - \\ & - 3,0153 y^{-2} + 0,9966) \text{ [Вт/м}^2 \text{]} \end{aligned} \quad (7)$$

при $q_0 = 3,7752 \cdot 10^7$ Вт/м²;
 $x \in [-6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$;
 $y \in [-10^{-3} \text{ м}; 10^{-3} \text{ м}]$.

Зависимости коэффициента теплопроводности $k(T)$ и удельной объемной теплоемкости $c_p(T)$ от температуры описываются

ся квадратичными полиномами [5]:

$$k(T) = 10,23 + 0,0063233 T + 1,6775 \cdot 10^{-6} T^2, (8)$$

$$c_V(T) = 414,22 + 0,30039 T + 0,00011797 T^2. (9)$$

Коэффициент теплового сопротивления принимаем: равным $R=0,3 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$. На рис. 2 представлено температурное поле квазистационарного состояния в заданном сечении технологического объекта из титанового сплава OT4-1 при расчете в программном комплексе STAR-CD при воздействии энергетического источника (6).

При воздействии на технологический объект из листового титанового сплава OT4-1 энергетического источника (6) максимальная температура T вдоль линии перемещения энергетического источника имеет место при $y \approx 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, т.е. через $t \approx 0,18 \text{ с}$ после прохождения центра источника над расчетной точкой. Величина максимальной температуры в центре зоны термического влияния равна $\max[T(x=0, y, z)]_{z=h_\delta} = 1314 \text{ К}$, где h_δ – заданная глубина обработки, а при $x = \pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ снижается в 1,47 раза. Ширина изотермы $T=1050 \text{ К}$ составляет $b_{T=1050 \text{ К}} = 6,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

При воздействии энергетического источника (7) практически выполняется условие равенства величин максимальных температур в центре зоны термического влияния и при $x = \pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$:

$$\begin{aligned} \max[T(x=0)_{z=h_\delta}]_y &= \\ &= \max[T(x = \pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ м})_{z=h_\delta}]_y = \\ &= \max[T(x = \pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ м})_{z=h_\delta}]_y = 1250 \pm 12 \text{ К}. \end{aligned}$$

Причем, по сравнению с воздействием энергетического источника (6)

$$\max[T(x=0, y, z)]_{z=h_\delta}]_y$$

уменьшается в 1,12 раза, а

$$\max[T(x = \pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}, y, z)]_{z=h_\delta}]_y$$

увеличивается 1,28 раза. Ширина изотермы $T=1100 \text{ К}$ увеличивается в 1,28 раза и принимает значение $b_{T=1100 \text{ К}} = 9,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Максимальная скорость нагрева точек на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ технологического объекта составляет $v_H \approx 7 \cdot 10^3 \text{ К/с}$. Скорость охлаждения в диапазоне значений температур от $T=1100 \text{ К}$ до $T=940 \text{ К}$ составляет $v_{охл} \approx 10^3 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ К/с}$.

Результаты расчетов показывают, что формирующиеся температурные поля достаточно однородны по всей длине излучения полосового энергетического источника, за исключением переходных зон вблизи краев ($\pm 1 \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$). Обработка поверхности полосовым энергетическим источником имеет ряд технологических преимуществ. В этом случае отдельные зоны лазерного воздействия, в которых достигается одна и та же степень развития структурно-фазовых превращений располагаются параллельно поверхности. Тем самым полосовой тепловой источник может обеспечить наиболее однородное распределение микромеханических характеристик по обработанной поверхности. Учет изменений формы светового пятна и распределения интенсивности приведет к качественным отличиям в распределении температурных полей. Максимальные значения температур могут достигать не в центре зоны термического влияния, а у краев лазерного пятна.

Так как специфика взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с деталью делает невозможным использование контактных способов измерения температуры, то для контроля температурных полей целесообразно применять инфракрасный термометр “Кельвин”. Результаты расчета и

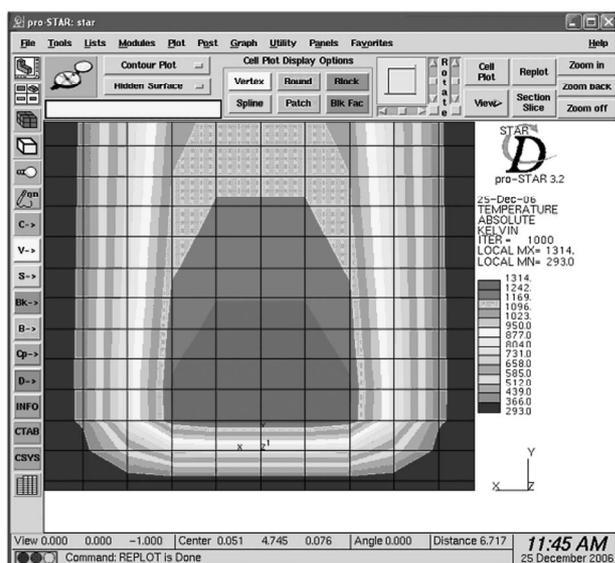


Рис. 2. Температурное поле квазистационарного состояния в заданном сечении технологического объекта из титанового сплава OT4-1 при расчете в программном комплексе STAR-CD

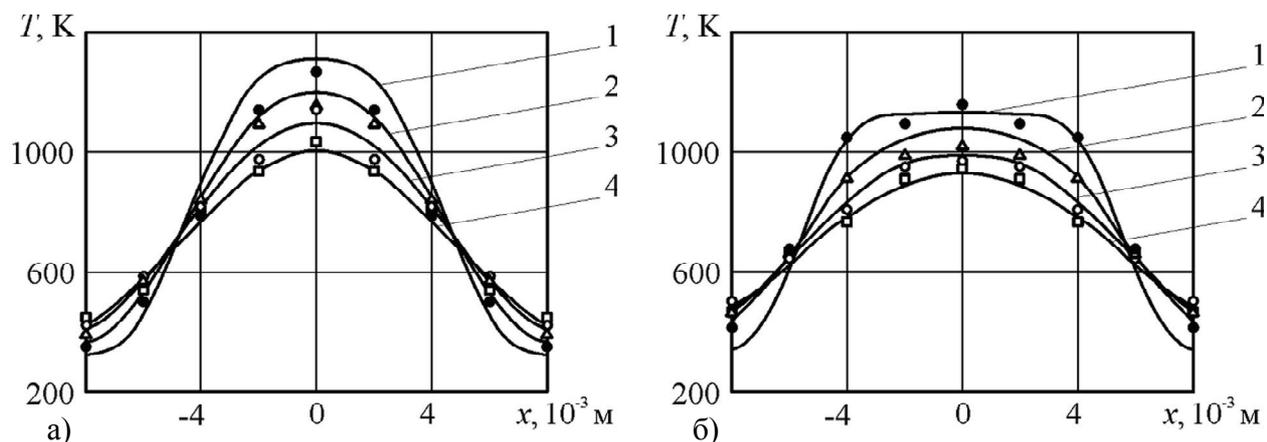


Рис. 3. Результаты расчета и экспериментальной оценки распределения температуры на поверхности технологического объекта из титанового сплава ОТ4-1 при воздействии поверхностных энергетических источников (6) (а) и (7) (б):

— результаты расчета: 1 – $y = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $y = 4 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $y = 6,5 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $y = 9 \cdot 10^{-3}$ м.
 Экспериментальные данные: ● – $y = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; △ – $y = 4 \cdot 10^{-3}$ м; ○ – $y = 6,5 \cdot 10^{-3}$ м; □ – $y = 9 \cdot 10^{-3}$ м.

экспериментальной оценки распределения температуры на поверхности технологического объекта из титанового сплава ОТ4-1 при воздействии поверхностных энергетических источников (6) и (7) представлены на рис. 3.

Проведенные исследования показали, что результаты расчета температурных полей в программном комплексе STAR-CD в листовом низколегированном титановом сплаве ОТ4-1 при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии удовлетворительно (погрешность не превышает 15...20%) коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Это позволяет сделать вывод о применимости программного комплекса STAR-CD для расчета температурных полей в конструкционных материалах. Применение полосовых энергетических источников для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты позволяет увеличить ширину зоны обработки без перегрева ее центральных участков.

Заключение

Проведен расчет температурного поля в пакете STAR-CD для технологического объекта из конструкционного материала – листового низколегированного титанового сплава ОТ4-1. Формирующееся температурное поле достаточно однородно по всей длине излучения полосового энергетического источника, за исключением переходных зон вблизи краев. Показано, что полосовой тепловой источник

может обеспечить наиболее однородное распределение микромеханических характеристик по обработанной поверхности.

При проведении экспериментальных исследований для контроля температурных полей применялся инфракрасный термометр “Кельвин”. Проведенные исследования показали, что результаты расчета температурных полей в программном комплексе STAR-CD в листовом низколегированном титановом сплаве ОТ4-1 при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии удовлетворительно (погрешность не превышает 15...20%) коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Это позволяет сделать вывод о применимости программного комплекса STAR-CD для расчета температурных полей в конструкционных материалах.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)" и гранта РФФИ 08-08-99080

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении / Р.Р. Латыпов, Н.Г. Тергулов, А.М. Смыслов, А.В. Любанов; под общ. ред. В.Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2007.

2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.К., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: МГТУ, 2006.
3. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. Некорректные обратные задачи теплопроводности: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Murzin S.P. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics // Journal of Advanced Materials, 2003. Vol. 10. №2.

CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN CONSTRUCTIONAL MATERIALS IN THE PROGRAM COMPLEX STAR-CD

© 2008 S.P. Murzin, A.V. Mezhenin, E.L. Osetrov

Samara State Aerospace University

Calculations of a temperature fields in the program complex STAR-CD for technological object from a constructional material – sheet low-alloy titanic OT4-1 are carried out. The conducted researches have shown that results of calculation of temperature fields in the program complex STAR-CD in sheet low-alloy titanic OT4-1 at influence of the moving distributed superficial energy sources well (the error does not exceed 15 ... 20 %) correlate with results of experimental researches. It allows to draw a conclusion on applicability of a program complex STAR-CD for calculation of temperature fields in constructional materials.