

РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для резки листовых полос используются машины термической резки. При разработке для них алгоритмов генерации управляющих программ имеет значение распределение тепловых полей при резке контуров, поскольку это может помочь оценить тепловые деформации полосы и уменьшить возникающие вследствие этого геометрические искажения вырезаемых заготовок. Для проверки корректности выбранного маршрута резки желательно уметь рассчитывать тепловые поля в полосе в течение всего процесса резки. В статье приведены математическая постановка задачи и метод расчета тепловых полей.

Адекватная оценка тепловых деформаций материала при термической резке заготовок на машинах с числовым программным управлением (ЧПУ) важна для обеспечения необходимых технологических требований. Имеются некоторые эвристические подходы к решению этой задачи [1–3], которые могут быть использованы при генерации управляющей программы как в интерактивном, так и в автоматическом режиме генерации.

Постановка задачи

Имеется металлическая пластина. Заданы контуры, последовательность их резки, точки врезки и направления обходов. Для режущего инструмента заданы «радиус теплового луча», мощность, скорость перемещения и скорость холостого хода. Требуется рассчитать тепловые поля при последовательной резке контуров.

Для решения задачи написана компьютерная система, состоящая из следующих подсистем: подготовка процесса, расчет процесса резки контуров, просмотр результатов.

Подготовка процесса

Задание материала и толщины листа, чтение dxf-файла с контурами, задание порядка резки, точек врезки и направлений обхода.

Расчет процесса резки контуров

Последовательно для каждого контура рассматривается задача нахождения $\theta(t, x)$ — температуры (t — момент времени, x — точка области), удовлетворяющей уравнению теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = k\Delta\theta + N, \quad x \in \Omega,$$

начальному условию

$$\theta(t_0, x) = \theta_0(x), \quad x \in \Omega,$$

граничному условию

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = M(\theta - \theta_*), \quad x \in \partial\Omega,$$

t из промежутка $[t_0, t_1]$, x — точка области $\Omega \in R^3$.

Здесь t_0 — время начала и t_1 — время окончания резки текущего контура, Ω — часть пластины, которая осталась после удаления областей, ограниченных предыдущими контурами, $\partial\Omega$ — граница области Ω .

Здесь c — удельная массовая теплоемкость, ρ — плотность, k — коэффициент теплопроводности, $N(t, x)$ — плотность тепловых источников, M — коэффициент теплопередачи, $\theta_0(x)$ — текущее температурное поле перед началом резки данного контура, θ_* — температура воздуха.

Функция N — плотность тепловых источников имеет следующий вид. Пусть толщина листа h , «радиус теплового луча» r , его мощность w и скорость перемещения v . Пусть $m(t)$ — положение оси теплового «луча» в момент t . Тогда $p = w/(\pi r^2 h)$ — плотность мощности теплового «луча» и $N(t, x) = p$ в точках, находящихся от прямой $m(t)$ на расстоянии меньше r и 0 в остальных точках.

Аппроксимация задачи

Процесс пересчета температурного поля $\theta(t, x)$ во время резки контура разбивается на малые промежутки времени $[t_{r-1}, t_r]$ длины Δt и для расчета $\theta(x) = \theta(t, x)$ рассматривается задача

$$c\rho \frac{\theta(x) - \theta_0(x)}{\Delta t} = k\Delta\theta(x) + N(x),$$

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = M(\theta - \theta_*),$$

где $\theta_0(t_{r-1}, x)$ и $N(x) = N(t_{r-1}, x)$.

Область Ω разбивается на тетраэдры, функции $\theta(x)$, $\theta_0(x)$, $N(x)$ — кусочно-линейные, определяемые значениями в узлах — вершинах тетраэдров. Решение данной задачи является точкой минимума следующего функционала

$$I(\theta) = \frac{1}{2\Delta t} \int_{\Omega} c\rho(\theta - \theta_0)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{\Omega} k |grad\theta|^2 dx -$$

$$\int_{\Omega} N\theta dx + \frac{1}{2} \int_{\partial\Omega} M(\theta - \theta_*)^2 dS.$$

Нахождение точки минимума данного квадратичного функционала проводится методом релаксации [4]. Выбор метода основан на следующих соображениях.

Так как радиус r «теплового луча» мал, то тетраэдры разбиения области должны иметь малый размер (в расчетах длина стороны была 2 мм) и поэтому их много. В узлах, далеких от точек, где уже был «те-

пловой луч» и куда еще не могло дойти изменение тепла к данному моменту времени, температура остается первоначальной. Метод релаксации позволяет пропустить такие узлы, что уменьшает время счета.

Замечание. Для уменьшения числа тетраэдров (узлов) при расчете резки очередного контура K_i рассматривается не вся оставшаяся пластина, а кусок $\Omega_i \supset \Omega_{i-1}$. Кусок достаточно большой, чтобы к моменту завершения резки контура K_i температура вне Ω_i не могла измениться. После завершения резки контура тетраэдры внутри контура удаляются и их число уменьшается. Далее производится расширение СКЭ до следующего куска Ω_{i+1} .

Просмотр результатов

Подсистема позволяет просматривать изменение температурных полей в процессе резки. На рис. 1 показан пример задания порядка резки 6 заготовок

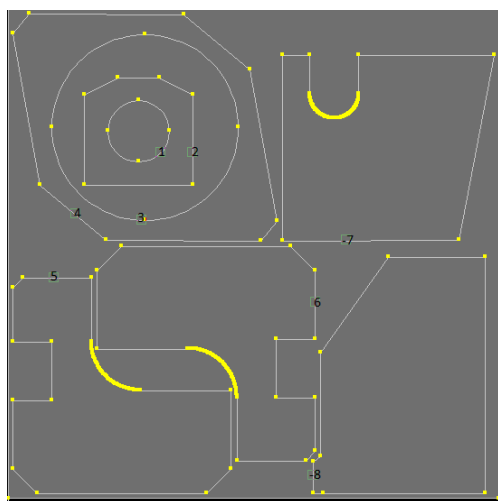


Рис. 1. Места точек врезки и порядок резки для 8 контуров

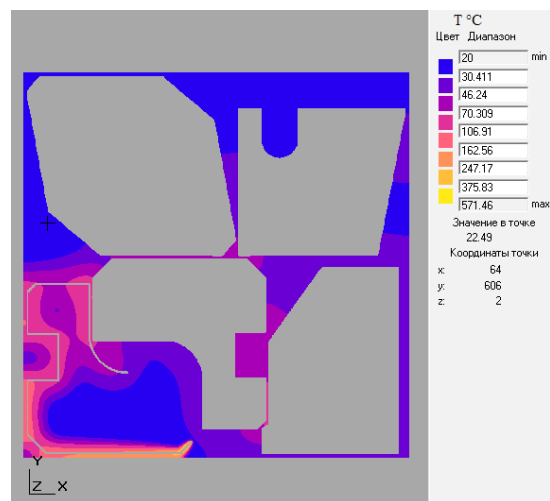


Рис. 2. Пример распределения тепловых полей в процессе резки 5-го контура

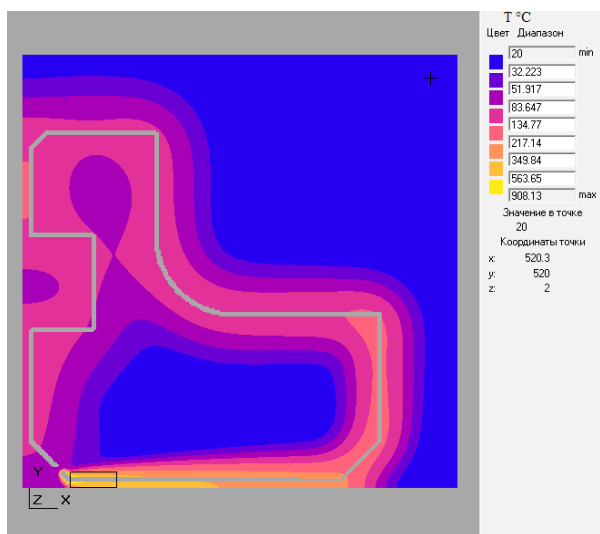


Рис. 3. Температурное поле при выборе точки врезки вблизи края пластины

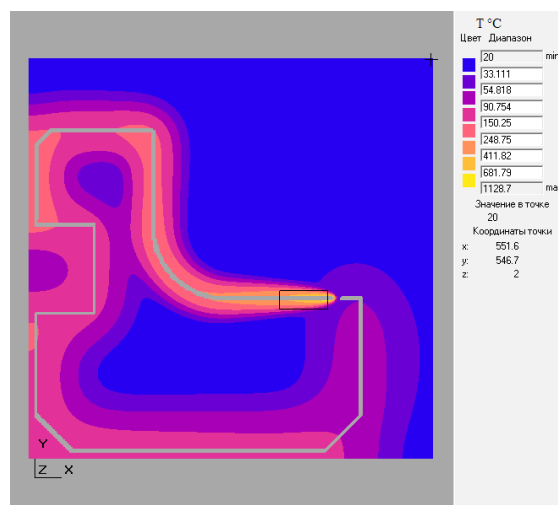


Рис. 4. Температурное поле при выборе точки врезки вдали от края пластины и границ вырезанных заготовок

Библиографический список

1. Dewil, R. Construction heuristic for generation tool parts for laser cutters / R. Dewil, R. Vansteenwegen, D. Cattrysse // Int. J. Prod. Res. 2014. Vol. 52, № 20. P. 5965–5984.
2. Dewil, R. An Improvement heuristic framework for for laser cutting tool part problem / R. Dewil, R. Vansteenwegen, D. Cattrysse, T. Vossen, M. Laguna // Int. J. Prod. Res. 2015. № 53 (6).

3. Петунин, А. А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала / А. А. Петунин // Вестн. УГАТУ. Сер. Управление, ВТ и И. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 280–286.

4. Гловински, Р. Численное исследование вариационных неравенств / Р. Гловински, Ж. Л. Лионс, Р. Тремольер. М. : Мир, 1979.

Сведения об авторах

Петунин Александр Александрович — доктор технических наук, профессор Уральского федерального университета, Екатеринбург. a.a.petunin@urfu.ru

Полищук Ефим Григорьевич — кандидат физико-математических наук, доцент Уральского федерального университета, Екатеринбург. e.polish@mail.ru

A. A. Petunin, E. G. Polishchuk

THERMAL FIELDS CALCULATION FOR THE THERMAL CUTTING PARTS FROM SHEET MATERIALS

To check the selected cutting tool path, it is desirable to calculate the thermal field in the sheet during the cutting process. In this article we study the mathematical methods for the calculation of thermal fields.