

УДК 621.9

Л.А. Княшко, В.Н. Торлин, проф., д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

auto@sevgtu14.sebastopol.ua

РАЗРАБОТКА ПОДПРОГРАММ МНОГОПРОХОДНОГО ТОЧЕНИЯ С КОРРЕКЦИЕЙ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛИ

Предлагаются алгоритмы построения подпрограмм многопроходного точения деталей на станках с ЧПУ, использующие результаты измерения интегральной температуры в зоне контакта инструмента с деталью.

Современные системы числового программного управления металлорежущим оборудованием, содержащие процессор PENTIUM V [1], позволяют в реальном времени анализировать пространственные деформации элементов технологической системы, в том числе обрабатываемой детали как нестационарного, быстроменяющегося объекта. Имеющиеся на сегодняшний день разработки в области анализа деформаций технологической системы основаны на косвенном измерении параметров системы [2] и последующем расчёте корректирующего воздействия по упрощённому алгоритму. Ресурсы современных УЧПУ позволяют в реальном времени рассчитывать температурные деформации детали и скорректировать управляющую программу в процессе обработки. Рассмотрим принципы построения таких алгоритмов.

Наиболее надёжным и доступным источником информации о состоянии технологической системы является интегральная температура зоны взаимодействия инструмента с поверхностью обрабатываемой детали. Работа, затрачиваемая на удаление припуска, в этой зоне переходит в тепло, которое затем распространяется между взаимодействующими элементами зоны резания: деталью, инструментом и образующейся стружкой. Количество тепла, уходящее в деталь, определяется по эмпирической зависимости Силина С.С. [3]

$$Q_0 = f(\bar{\sigma}, \bar{S}, Pe, T_{рез}), \quad (1)$$

в которой алгебраически связаны: $\bar{\sigma}$ - вектор физико-механических свойств взаимодействующих элементов (коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, предел текучести, удельная теплоёмкость и др.); $\bar{S}$ - вектор геометрических параметров инструмента и детали; Pe - критерий Пекле; $T_{рез}$ - среднеинтегральная температура, измеряемая с помощью термопары непрерывно в течение всего процесса обработки.

В зависимости от соотношения физико-механических свойств детали и инструмента Q_0 может составлять 40...60% общей затраты энергии на процесс резания. Подставляя исходные данные в (1), можно легко определить температуру поверхности детали на линии контакта [3], необходимой для формирования граничных условий задачи теплопередачи:

$$T_{\partial}' = f(\bar{\sigma}, \bar{S}, Pe, T_{рез}). \quad (2)$$

Задача теплопроводности детали цилиндрической формы длиной l формулируется следующим образом (рисунок 1): найти температурное поле $T = f(r, z)$ при движении T_{∂}' по поверхности детали диаметром D в направлении S (точки 1, 2, 3...). Если деталь вращается с частотой 10 с^{-1} , то в силу инерционности процесса распространения тепла можно с погрешностью менее 1 % считать, что на деталь действует кольцевой источник тепла T_{∂}' шириной S_1 . Представим температуру поверхности $r=D/2$ линейной сплайн-функцией:

$$T_{\partial}' = T_0(a_0 + a_1 z).$$

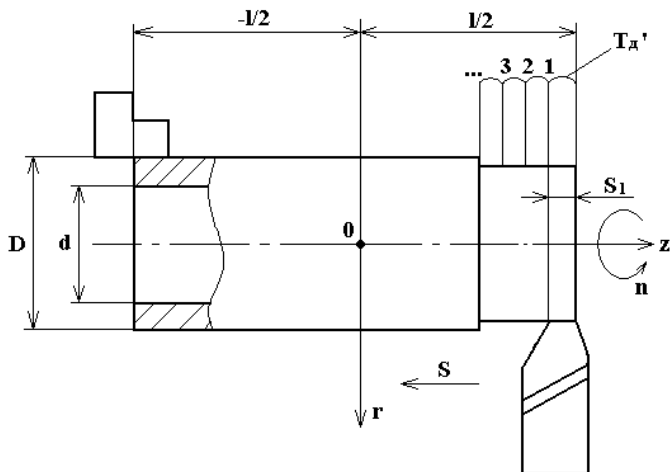


Рисунок 1 - Граничные условия задачи теплопроводности

Распространение тепла в материале детали представим уравнением

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала цилиндра; r, z – цилиндрические координаты, t – время.

Интегрирование уравнения (3) будем осуществлять следующим образом. Представим функцию $T(r,z,t)$ в виде суммы двух функций

$$T(r, z, t) = T_1(r, t) + T_2(z, t), \quad (4)$$

где функции $T_1(r, t)$ и $T_2(z, t)$ удовлетворяют следующим граничным условиям

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial r} - \frac{\alpha_1}{\lambda_q} (T_1 - \Theta_1) &= 0 \mid r = d/2, \\ \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\alpha_2}{\lambda_q} (T_1 - \Theta_2) &= 0 \mid r = D/2, \\ \frac{\partial T_2}{\partial z} + \frac{\alpha_3}{\lambda_q} (T_2 - \Theta_2) &= 0 \mid z = l/2, \\ \frac{\partial T_2}{\partial z} - \frac{\alpha_4}{\lambda_q} (T_2 - \Theta_2) &= 0 \mid z = -l/2, \end{aligned} \quad (5)$$

и начальным условиям

$$\begin{aligned} T_1(r, t) &= \Theta_2 \mid t = 0; r = D/2, \\ T_2(z, t) &= T'_0 \mid t = 0; z = l/2, \end{aligned} \quad (6)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи на цилиндрических поверхностях соответствующих $r = d/2$ и $r = D/2$; α_3 и α_4 – коэффициенты теплоотдачи на поверхностях $z = \pm l/2$; λ_q – коэффициент теплопроводности; Θ_1 – начальная температура детали; Θ_2 – температура потока смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Подставляя выражение (4) в (3), получаем для функции T_1 уравнение

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_1}{\partial t}, \quad (7)$$

а для функции T_2

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_2}{\partial t}. \quad (8)$$

Для интегрирования (7) представим T_1 в виде

$$T_1(r, t) = \Phi_1(r) e^{kt},$$

где $\Phi_1(r)$ удовлетворяет решению уравнения

$$\Phi_1''(r) + \frac{1}{r} \Phi_1'(r) - \frac{k}{a} \Phi_1(r) = 0, \quad (9)$$

Решение (9) имеет вид

$$\Phi_1(r) = C_1 J(r) + C_2 Y(r),$$

где J – функция Бесселя нулевого порядка, Y – функция Бесселя первого порядка.

Для интегрирования выражения (8) представим T_2 в виде

$$T_2(z, t) = \Phi_2(z) e^{pt},$$

где $\Phi_2(z)$ удовлетворяет уравнению

$$\Phi_2''(z) - \frac{p}{a} \Phi_2(z) = 0,$$

решение которого в свою очередь имеет вид:

$$\Phi_2(z) = C_3 e^{\left(\sqrt{\frac{p}{a}} z + pt\right)} + C_4 e^{\left(pt - \sqrt{\frac{p}{a}} z\right)}.$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий (5), а неизвестные коэффициенты k и p – из начальных условий (6).

Полученное решение задачи теплопередачи в форме (4) далее используем для определения температурных деформаций, для чего воспользуемся решением задачи термоупругости [4] в виде

$$u_r = \frac{\lambda + 2G}{4G(\lambda + G)} \int \nabla^2 U dr - \frac{1}{2G} \frac{\partial (U - F)}{\partial r} - \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} r, \quad (10)$$

где λ – коэффициент Ляме, связанный с модулем упругости G и коэффициентом Пуассона ν следующей зависимостью:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}.$$

Здесь U – функция, заданная в виде

$$U = c_1 \ln r + c_2 r^2;$$

F – функция, удовлетворяющая уравнению

$$rF'' + F' = rT(r, z, t).$$

В каждом конкретном случае для использования полученных решений в системе управления станком необходимо выражения (4) и (10) представлять с определёнными численными значениями входящих в них параметров, а температуру резания – из выражений (1), (2).

При решении задачи теплопередачи для стального цилиндра ($E=2,04 \times 10^5$ МПа, $\nu=0,3$) с размерами $d=25$ мм, $D=50$ мм, $l=100$ мм, с начальной температурой $\Theta_1=20^\circ\text{C}$ и температурой СОЖ $\Theta_2=15^\circ\text{C}$, коэффициентом температуро-проводности $a=0,66 \times 10^{-5}$ м²/с, коэффициентами теплоотдачи $\alpha_1=750$ Вт/м² · град, $\alpha_2=800$ Вт/м² · град, $\alpha_3=\alpha_4=750$ Вт/м² · град и коэффициентом теплопроводности $\lambda_q = 32$ Вт/м · град выражение (5) примет вид

$$T(r, z, t) = (21,54J(0;21,32r) - 0,39Y(0;21,32r))e^{-0,003t} + (8,34e^{0,12 \times 10^{-7} z} + 7,51e^{-0,12 \times 10^{-7} z})e^{0,1 \times 10^{-20} t} \quad (11)$$

а перемещения u_r можно вычислить по формуле:

$$u_r = 0,2 \times 10^9 r - \frac{0,9 \times 10^{-6}}{r} + \frac{0,6 \times 10^{-5}}{r} (0,005e^{-0,003t} + 0,002e^{0,1 \times 10^{-20} t} + 0,002e^{0,1 \times 10^{-20} t} e^{-0,1 \times 10^{-7} z}) \quad (12)$$

Если при составлении управляющих программ (УП) для токарного станка с ЧПУ используется техника подпрограмм (системы Fanuc 7M, SINUMERIK, CNC 332), то полученное выражение может быть представлено в подпрограмме L в следующем виде:

$$N100 F_1 = 0,2 \times 10^9 r - \frac{0,9 \times 10^{-6}}{r} + \frac{0,6 \times 10^{-5}}{r} (0,005e^{-0,003t} + 0,002e^{0,1 \times 10^{-20} t} + 0,002e^{0,1 \times 10^{-20} t} e^{-0,1 \times 10^{-7} z}) ;$$

N105 L1 (P1=2,2×10⁵, P2=0,3, P3=0,0125, P4=0,025, P5=0,1, P6=t, P7=F₁);

N110 x=20 - F₁, z=30, P8= 2,

N115 S8, F25, M4, L1.

Таким образом, коррекция размера детали на величину F₁ осуществляется по следующему алгоритму.

1. При составлении УП вводятся физико-механические и геометрические характеристики изделия.

2. По данным измерения $T_{рез}$ рассчитывается $T(r, z, t)$ по формуле (11).

3. По величине $T(r, z, t)$ определяется u_r по формуле (12).

4. Найденное значение вносится в УП как величина коррекции.

Применение данного алгоритма позволит повысить точность обработки и производительность операции точения.

Особенно эффективна данная методика при разработке управляющих программ для обработки перспективных титаносодержащих сплавов и производства изделий из них для авиационной техники.

Библиографический список

1. Сосонкин В.Л. Конфигурация систем ЧПУ типа PCNC / В.Л. Сосонкин // Автоматизация и управление в машиностроении. — 2002. — Вып. 18. — С. 18 – 23.

2. Соломенцев Ю.М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.А. Митрофанов, А.А. Гусев. — М.: Машиностроение, 1980. — 536 с.

3. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов / С.С.Силин. — М.: Машиностроение, 1979. — 152 с.

4. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. — К.: Наук. думка, 1970. — 307 с.

Поступила в редакцию 25.03.2004 г.