

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

УДК 629.45/46.04.67

Элязов Исраил Шукюр оглы – к.т.н., доцент (Баку, Азербайджанский технический университет)

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ БУКСЫ

Безопасность движения подвижного состава в большей степени зависит от надежности буксы, которая характеризуется способностью безотказной ее работы в сложных условиях эксплуатации. Надежность зависит от качественных параметров деталей буксы и ее напряженного состояния, возникающего под влиянием действующих нагрузок, которые приводят к появлению дефектов. Дефекты на поверхности деталей, возникающие в эксплуатации, устраняют механической обработкой при ремонте. Буксовые узлы относятся к ходовым частям вагона. Детали буксового узла при эксплуатации теряют свои качества и изнашиваются.

При ремонте основные детали буксы восстанавливают с помощью механической обработки. При механической обработке возникают структурные изменения в качестве поверхности детали. Это зависит от неправильного выбора режимов резания при механической обработке и наличия тепловых процессов в технологических системах. Поэтому, исследования теории тепловых процессов, возникающих при механической обработке, являются весьма актуальными.

В связи с развитием компьютерной техники все более широкое применение при описании тепловых процессов в технологических системах находят численные методы решения дифференциального уравнения теплопроводности. С учетом вышесказанного, представляет интерес возможность изучения методом конечных элементов, распределения температурных полей деталей при механической обработке.

Покажем применение метода конечных элементов [1, 2] к решению конкретной технологической задачи: абразивным кругом ($V_k = 25 м/сек., D = 250 мм$) обрабатывают верхнюю плоскость пластинки для изготовления деталей букс ($10 \times 10 \times 100$), укрепленной на подвижном столе-станке [3].

Обрабатываемую поверхность можно считать адиабатической, а пятно нагрева плоским, из-за малой величины глубины резания $t = 20 мкм, S_{np} = 12 м/мм, S_n = 2,3 мм$, длиной $l_k = \sqrt{Dt}$ с равномерно распределенным по площадке $b \cdot l_k$ плотностью тепловыделителя - q [4].

Рассмотрим подробнее эту элементарную часть и определим контактную температуру и распределение температуры в пластинке. Для удобства выполнения вычислений, эта элементарная часть может быть представлена в стержневой форме.

Процесс теплопроводности в условиях рассматриваемой задачи описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} - \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

Поскольку, вследствие адиабатичности плоскостей, по правилам отражения источников, двухмерная задача преобразуется в одномерную:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, K_x = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (2)$$

С граничным условием:

$$K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + q = 0, \text{ при } x = 0 \quad (3)$$

$$K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + h(\theta - \theta_0) = 0, \text{ при } x = l \quad (4)$$

При большой скорости вращения круга $V_k = 2,5 \text{ м/с}$, поверхность теплового источника можно считать изолированной, и, что теплообмен наблюдается на поверхностях пластины. Тогда рассматриваемая схема будет в следующей форме (рис.1)

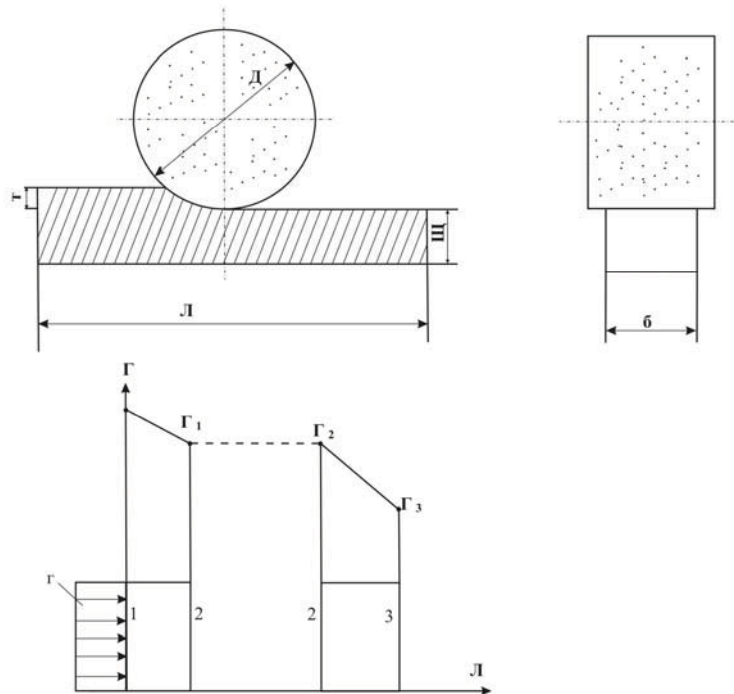


Рисунок 1 – Температурное поле в пластинке, рассчитанное методом конечных элементов

Основная идея метода конечных элементов (МКЭ) состоит в том, что непрерывная функция $\theta(X)$ и аналогичные ей функции аппроксимируются кусочно-непрерывными функциями, причем, каждая из последних определяется для отдельных элементов нагреваемого тела.

В вариационном исчислении [5] устанавливается, что для минимизации функционала МКЭ дифференциальное уравнение (2) аппроксимируют в следующей форме:

$$X = \int_V \frac{K_x}{2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \partial V + \int_S \left[q\theta + \frac{1}{2} h(\theta - \theta_0)^2 \right] \partial S \quad (5)$$

Уравнение (5) служит отправной точкой для определения температуры в каждом узле. Мы минимизируем функционал X , используя множество функций элементов, каждая из которых определена на отдельном элементе и выражена через узловые

значения. Узловые значения – неизвестные величины в нашей формулировке. Так как они определяют значения функционала X , минимизация должна быть проведена по этим величинам.

Реализация МКЭ начинается с определения подобластей и их узловых точек. Стержень может быть разбит на два линейных элемента (рис.1) с узловыми значениями $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Температура внутри элементов находится из формулы интерполяционного полинома для линейного элемента [6]:

$$\theta = N_i \theta_i + N_j \theta_j, \quad (6)$$

где N_i, N_j - функции формы:

$$N_i = (x_j - x)/l; \quad N_j = (x - x_i)/l \quad (7)$$

Для рассматриваемого примера функционал представляет собой сумму следующих интегралов:

$$X = \int_V \frac{1}{2} K_x \left[\frac{\partial \theta(x)}{\partial x} \right]^2 \partial V + \int_{S_1} q \theta(x) \partial S + \int_{S_2} \frac{h}{2} [\theta(x) - \theta_0]^2 \partial S, \quad (8)$$

где: S_1, S_2 - площади поверхностей.

Поверхностные интегралы легко вычисляются, так как подинтегральным выражениям соответствуют узловые значения.

Начнем с интеграла, включающего тепловой поток - q :

$$\int q \theta(x) \partial S = q \theta_1 \int_S \partial S = q \theta_1 A_1, \quad (9)$$

где A_1 - площадь поперечного сечения стержня, соответствующая первому узлу.

Рассмотрим поверхностный интеграл, включающий коэффициент теплообмена - h :

$$\int \frac{h}{2} [\theta(x) - \theta_0]^2 \partial S = \frac{h}{2} (\theta_3 - \theta_0) \int_{S_2} \partial \theta = \frac{h A_3 (\theta_3 - \theta_0)^2}{2} = \frac{h A_3}{2} (\theta_3^2 - 2\theta_3 \theta_0 + \theta_0^2) \quad (10)$$

Объемный интеграл в (8) содержит производную от температуры. Дифференцируя уравнение (6), получаем:

$$\frac{\partial \theta^{(1)}}{\partial x} = \frac{1}{l_1} (-\theta_1 + \theta_2) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta^{(2)}}{\partial x} = \frac{1}{l_2} (-\theta_2 + \theta_3)$$

Объемный интеграл должен быть разбит на два интеграла, потому что выражение $\partial \theta / \partial x$ не сохраняет непрерывность по объему пластины в целом. Разделение, постановка и интегрирование дают:

$$\int_V K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \partial V = \frac{K_x^{(1)} A^{(1)}}{2l_1} \cdot (-\theta_1 + \theta_2)^2 + \frac{K_x^{(2)} A^{(2)}}{2l_2} \cdot (\theta_2 + \theta_3)^2 \quad (12)$$

При вычислении интеграла предполагалось, что площадь поперечного сечения элемента постоянна, так что $\partial V = A' \partial x$. Представление объемного интеграла по области

в виде суммы интегралов, каждый из которых вычисляется по отдельному элементу. Это является важной особенностью МКЭ.

Значение функционала получается из выражений (9), (10) и (11). В результате получается выражение значения температуры:

$$X = \frac{C_1}{2}(\theta_1^2 - 2\theta_1\theta_2 + \theta_2^2) + \frac{C_2}{2}(\theta_2^2 - 2\theta_3\theta_2 + \theta_3^2) - qA_1\theta_1 + \frac{hA_3}{2}(\theta_3^2 - 2\theta_3\theta_0 + \theta_0^2),$$

$$C_1 = A_1K_x/l_1 \quad \text{и} \quad C_2 = A_2K_x/l_2, \quad (13)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = C_1\theta_1 - C_1\theta_2 - qA_1 = 0,$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = -C_1\theta_1 + (C_1 + C_2)\theta_2 - C_2\theta_3 = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = -C_2\theta_2 + (C_3 + hA_3)\theta_3 - hA_3\theta_0 = 0$$

Уравнения (14) могут быть преобразованы в виде:

$$\begin{bmatrix} C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 \\ 0 & -C_2 & (C_2 + hA_3) \end{bmatrix} \begin{matrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{matrix} = \begin{matrix} qA_1 \\ 0 \\ hA_3\theta_0 \end{matrix} \quad (15)$$

или к более общей матричной форме:

$$[K_x]_x \theta = F \quad (16)$$

Матрицу коэффициентов $[K_x]$ в формуле обычно называют глобальной матрицей жесткости теплопроводности. Векторный столбец $\{F\}$ называют глобальным вектором нагрузки.

Последний шаг нашего анализа заключается в задании конкретных значений для физических характеристик материала деталей буксы и получении числовых значений температуры.

Исходные данные для расчета:

$K_x = 27,2 \text{ Вт/м} (^\circ\text{C})$ – коэффициент теплопроводности материала [7],

$h = 2,62 \cdot 62 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C)}$ – коэффициент теплообмена материала [4],

$l = 0,1 \text{ м}$ - длина стержня,

$q = 4,55 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ – плотность теплового потока [5],

$\theta = 20^\circ\text{C}$ - температура окружающей среды.

Окончательная система уравнения может быть представлена в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 0,121 & -0,121 & 0 \\ -0,121 & 0,242 & -0,200 \\ 0 & -0,2 & 0,18 \end{bmatrix} \begin{matrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{matrix} = \begin{matrix} 10,2 \\ 0 \\ 1,17 \end{matrix} \quad (17)$$

Решая систему уравнения (17) с помощью составленной программы получены следующие условные значения температуры: $\theta_1 = 361^\circ\text{C}, \theta_2 = 277^\circ\text{C}, \theta_3 = 192^\circ\text{C}$

<pre> 1. FORMAT (9 F 8.3) N= 3 CALL GAUS (A, B, X, 3) PRINT 2, X 2. FORMAT (3 F 15.6) END SUBROUTINE (A, B, X, N) DIMENSION A(n,n), B(n), X(n) M=N-1 DO 300 K=1, M K1=K+1 L=K DO 400 I=K1,N IF (ABS(A(I,K)) - ABS (A(L,X))) 400,400,401 401. L=I 400. CONTINUE IF (L-K) 500,500,405 405. DO 410 J=K,N R=A (K,J) A(K,J)= A (L,J) 410. A(L,J)=R </pre>	<pre> R=B(K) B(K)=B(L) B(L)=R 500. DO 300 I=K1, N R=A(I,K)/ A(K,K) A(I,K)=0 DO 301 J=K1,N 301.A(I,J)= A(I,J)-R A(K,J) 300. B(I)= B(1)- R B(K) X(N)=B(N)/A(N,N) I=M 701. I1=I+1 R=0 DO 700 J=I1,N 700. R=R+A (I,J) X(J) X(I)= (B(I)-R)/ A(I,I) I=I-1 IF (I) 900, 800, 710 800. TYPE 900, (X(I),I=1,N) 900. FORMAT (6 F12.5///) RETURN END </pre>
---	---

361.30688

277.00934

192.71184

Вывод. Полученные параметры распределения температуры в пластинке показывают, что обработка деталей по выбранным режимам не приводит к появлению дефектов и сохраняет качество поверхности деталей буксы. Предлагаемый технологический процесс механической обработки не снижает эксплуатационную надежность деталей буксы и безотказность при ее эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкович О. Метод конечных элементов в технике. Пер. с англ. языка. – М.: Мир. 1975. – 215 с.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с англ. языка. – М.: Мир. 1979. – 329 с.
3. Технология производства и ремонта вагонов. Под ред. К.В. Мотовилова. – М.: Маршрут. 2003. – 382 с.
4. Элязов И.Ш. Повышение эффективности инструментов из безвольфрамовых инструментальных сталей оптимизации шлифований. Автор. дис. ... канд. тех. наук. – М.: МАМИ, 1992. – 18 с.
5. Резников А.Н., Резников Л.Н. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 287 с.
6. Лахтин Ю.Ф., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М., 1990. – 528 с.
7. Самойлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.