А. И. Банников, О. А. Макарова, Р. И. Аржуханов, Е. О. Сиукова

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА В ЗУБЕ ПИЛЫ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ
ПРИ ПАКЕТНОЙ РЕЗКЕ ХОЛОДНОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: alc19@mail.ru

В настоящей публикации рассматривается вопрос, связанный с исследованием распределения тепла в зубе пилы с модифицированной геометрией с учетом периодичности процесса резания холодного металлопроката дисковыми пилами.

Ключевые слова: дисковые пилы, пакет труб, пакетная резка, температурное поле.

A. I. Bannikov, O. A. Makarova, R. I. Arzhanov, E. O. Siukova

**HEAT DISTRIBUTION IN THE TOOTH OF A SAW WITH A MODIFIED
GEOMETRY DURING BATCH CUTTING OF COLD ROLLED STEEL**

Volgograd State Technical University

This publication deals with the issue related to the study of the heat distribution in the tooth of a saw with a modified geometry, taking into account the frequency of the process of cutting cold rolled metal with circular saws.

Keywords: disk saw, pipe bundle (batch), batch saw cutting, temperature field.

В работе рассматривается распределение тепловых потоков в зубе пилы модифицированной геометрии при резании холодного металлопроката дисковыми пилами в ТПЦ – 2 АО ВТЗ.

Пакетная резка салазковой пилой характеризуется высокой производительностью и нашла широкое применение в производственных условиях металлургических предприятий. В тоже время значительный износ инструмента требует анализа тепловых процессов [1, 2].

Удаления материала из зоны обработки сопровождается выделением большого количества тепла вследствие трения задней поверхности инструмента об обрабатываемый материал. Значительное увеличение температуры приводит к интенсивному износу, выражающимся в деформации зубьев пилы. Нагрев зубьев стандартных дисковых пил был рассмотрен в работе [2].

Изменение геометрии режущей части инструмента введением заднего угла α уменьшает длину контакта. Это приводит к уменьшению тепловыделения и увеличению стойкости инструмента. Анализ температурного поля для зуба пилы с модифицированной геометрией проводится с использованием метода источников теплоты, включая отраженные источники теплоты [3].

Для расчета температуры на контактной поверхности в конце рабочего хода (за время контакта, $\tau = \tau_k$) используется полученное ранее выражение для температуры на задней поверхности зуба для мгновенного полосового неподвижного источника тепла [2, 3].

Полученная зависимость позволяет определять температуру поверхности зуба, контактирующей с нагретой обрабатываемой поверхностью:

$$T_z = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_z \cdot \tau}\right] \cdot \left(\Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_z \cdot \tau}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_z}{2\sqrt{\omega_z \cdot \tau}}\right]\right), \quad (1)$$

где $\Phi(x, \tau)$ – безразмерная функция ошибок, описывающая распределение температуры по ширине площадки контакта зуба [3]; ω_z – коэффициент температуропроводности материала пилы, $\text{м}^2/\text{с}$ [5]; l_z – длина контактной площадки по задней грани зуба пилы, мм; T_k – температура контакта, $^{\circ}\text{C}$; x, y – координаты точки зуба пилы (рис. 1).

Для определения распределения температуры по высоте зуба пилы необходимо учесть влияние граничных поверхностей, приводящих

полубесконечное тело к усеченной пирамиде. Введем две симметричные адиабатические границы, под углом 20° к оси зуба (рис. 1).

Тепловой поток в зубе отражается от границ раздела, что увеличивает температуру. Для описания граничных условий на боковых поверхностях зуба воспользуемся методом отраженных источников теплоты.

Правый тепловой источник находится далеко от вершины инструмента и его влиянием можно пренебречь.

Рис. 1. Система координат зуба пилы и расположение левого фиктивного источника тепла

Температура в точке $M(x, y)$ складывается из теплового потока на задней границе зуба пилы и фиктивного теплового потока от отраженного источника. Этот фиктивный источник расположен симметрично основному источни-

ку относительно границы раздела (рис. 1).

Координаты точки M в системе координат (x', y') для левого фиктивного источника теплоты можно найти из выражений:

$$\begin{aligned} x' &= R \cdot \cos\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right) + l_3 = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right) + l_3 \\ y' &= R \cdot \sin\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right) = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Тепловой поток на задней границе зуба пилы рассчитывается по формуле (1). Фиктивный тепловой поток от отраженного источника учитывает изменение координат (x', y') , ко-

торые находятся по формулам (2).

Суммарный тепловой поток найден из формулы (3):

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau}} \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau}\right] \cdot \left(\Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right] \right) + \right. \\ &+ \exp\left[-\frac{\left(\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right)\right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau}\right] \times \\ &\times \left. \left(\Phi\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right) + l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right] - \Phi\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha\right)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right] \right) \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для иллюстрации полученного решения в программе Excel была сформирована расчетная таблица и получено поле рапределения температур от нагрева зуба в начале цикла в момент времени $\tau = 0,006$ с. Распределение температур по высоте зуба показано на рис. 2–8.

Анализ температурного поля показывает, что зуб пилы в начальный момент ($\tau = 0,002$ с, $\tau = 0,004$ с) испытывает импульсное нагружение. Тепло быстро распространяется в тело пилы.

Рис. 2. Температурное поле зуба пилы в начальный момент времени при $\tau = 0,002$ с

Рис. 3. Температурное поле зуба пилы в момент времени $\tau = 0,004$ с

При $\tau = 0,02$ с температура задней поверхности уменьшается, боковые поверхности зуба

нагреваются. Температурное поле выравнивается.

Рис. 4. Температурное поле зуба пилы в момент времени $\tau = 0,02$ с

В конце цикла и холостого хода при $\tau = 0,06$ с вершина зуба охлаждается до температуры около 50°C . Затем начинается новый цикл нагрева, зуб пилы входит в контакт с обрабатываемой поверхностью.

Рис. 5. Температурное поле зуба пилы в конце цикла (один оборот пилы) при $\tau = \tau_d = 0,06$ с

Для расчета температурного поля в зависимости от количества циклов N необходимо учесть прерывистость процесса резания по известной зависимости [2]. Сначала определяется температурное поле в конце каждого цикла при $\tau = \tau_d \cdot N$.

$$\Delta T_{3N} = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau_d \cdot N}} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N} \right] \cdot \left(\Phi \left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] - \Phi \left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] \right) + \right. \\ \left. + \exp \left[-\frac{\left(\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha \right) \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N} \right] \times \right. \\ \left. \times \left(\Phi \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha \right) + l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] - \Phi \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left(\arctg \frac{y}{x} - 40 - 2\alpha \right)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] \right) \right\}. \quad (4)$$

Затем определяется суммарный нагрев поверхности зуба пилы от всех N циклов [2]:

$$\Delta T_{3N_\Sigma} = \Delta T_{3_1} + \Delta T_{3_2} + \Delta T_{3_3} + \dots + \Delta T_{3_N}. \quad (5)$$

Распределение температур по высоте зуба для $N=5$ показано на рис. 6. Вершина зуба пилы нагрелась до 250°C на расстояние около 1 мм.

Расчет температурного поля для 10 циклов (рис. 7) показал, что вершина нагревается до 300°C , а основание зуба до 150°C .

С увеличением продолжительности реза температура вершины зуба постепенно стабилизируется. На рис. 8 показано распределение температуры через 50 оборотов пилы. Поверхность контакта нагревается выше 350°C .

Рис. 6. Температурное поле зуба пилы после пяти оборотов при $\tau = 0,3$ с

Рис. 7. Температурное поле зуба пилы после десяти оборотов при $\tau = 0,6$ с

Рис. 8. Температурное поле зуба пилы после пятидесяти оборотов при $\tau = 3$ с

Рис. 9. Максимальная расчетная температура зуба:
а – охлаждение за один оборот пилы; б – нагрев за 50 оборотов

На рис. 9 представлено изменение максимальной расчетной температуры зуба в зависимости от времени реза для пил с модифицированной ($\alpha = 5^\circ$) и с традиционной геометрией.

Выводы

Сравнительный анализ максимальной температуры рабочей поверхности зуба с модифицированной и с традиционной геометрией [2] показал, что введение заднего угла α значительно уменьшает площадку контакта и снижает нагрев вершины зуба пилы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Thermofrictional pipe cutting / Ю. Н. Поляничков, А. И. Курченко, А. И. Банников, О. А. Макарова, А. А. Бан-

ников // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 7. – С. 745–746.

2. Исследование распределения тепла в зубе пилы с учетом периодичности процесса при пакетной резке холодного металлопроката / А. И. Банников, О. А. Макарова, И. С. Ширяев, А. Д. Осипов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (243) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 7–13.

3. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.

4. Коновалов, А. В. Теория сварочных процессов / А. В. Коновалов [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.

5. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов / В. С. Чиркин. – Рипол Классик, 2013.