

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-8-243-7-13

*А. И. Банников, О. А. Макарова, И. С. Ширяев, А. Д. Осипов*

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА В ЗУБЕ ПИЛЫ С УЧЕТОМ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОЦЕССА 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 учетом периодичности процесса резания холодного металлопроката дисковыми пилами.

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

*A. I. Bannikov, O. A. Makarova, I. S. Shiryayev, A. A. Osipov*

### INVESTIGATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF BURRS ON THE PIPE END DURING BATCH CUTTING OF COLD ROLLED METAL

Volgograd State Technical University

This publication addresses the issue of studying the distribution of heat in a saw's tooth, taking into account the periodicity of the process of cutting cold metal with circular saws.

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

Данная работа посвящена исследованию распределения тепла в зубе пилы при резании холодного металлопроката дисковыми пилами в ТПЦ – 2 АО ВТЗ.

Широкое применение в производственных условиях металлургических предприятий нашла пакетная резка салазковой пилой. Данный способ имеет значительный экономический эффект и характеризуется высокой производительностью. Несмотря на большой ресурс дискового инструмента, за счет возможности переточки с почти полным восстановлением первоначальных геометрических характеристик, проблема повышенного износа дисковых пил достаточно актуальна [1; 2].

При разрезании пакета труб происходит значительное увеличение длины контакта инструмента и заготовок. В результате чего инструмент перегревается, а температура значительного объема обрабатываемого материала в приконтактной зоне близка к температуре плавления.

Из-за малой величины подачи на зуб ( $S_z = 0,0015$  мм/зуб), основным процессом уда-

ления материала из зоны обработки можно считать процесс термофрикционного резания [1; 2].

Значительное увеличение температуры, силы резания и большое количество внешних факторов подвергают зуб большим нагрузкам, в результате которых он деформируется (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент пилы с деформированными зубьями

Рассмотрим влияние прерывистости процесса резания пакета труб дисковой пилой. Нагрев зуба пилы происходит за время контакта с заготовкой (рабочего хода), а охлаждение при выходе из зоны контакта во время холостого хода [2].

Время рабочего цикла равно времени оборота пилы:

$$\tau_u = \tau_d = \frac{60}{n} = 0,06 \text{ с.} \quad (1)$$

Время рабочего хода зуба пилы [229]:

$$\tau_p = \tau_k = 0,00152 \text{ с.} \quad (2)$$

Время холостого хода зуба пилы равно:

$$\tau_x = (\tau_u - \tau_p) = (\tau_d - \tau_k) = 0,0584 \text{ с.} \quad (3)$$

Нагрев зуба можно разделить на три этапа.

На первом взаимодействии холодного зуба пилы с холодным обрабатываемым материалом приводит к выделению большого количества тепла, обусловленного процессом трения. Длительность этого процесса очень мала вследствие больших скоростей при резании. На этапе обрабатываемый материал быстро нагревается, количество тепла от трения  $Q_{mp}$  распределяется в обрабатываемый материал  $Q_{нагр}$  и в зуб пилы  $Q_3$ .

Второй этап представляет собой взаимодействие холодного зуба пилы с заготовкой, нагретой до высоких температур, близких к температуре стабилизации  $T_{cm}$  [2]. Зуб пилы, вследствие большой длительности холостого хода, по сравнению с рабочим ходом, успевает охладиться. Тепловой поток, выделяющийся от трения, уменьшается из-за изменения физических свойств обрабатываемого материала при нагревании. Тепловой поток в зуб зависит от разницы температур горячего обрабатываемого материала и холодного зуба пилы.

На третьем этапе зуб пилы не успевает охладиться за время холостого хода и нагревается до температур стабилизации. Количество тепла, поступающего в зуб  $Q_3$ , уменьшается, так как уменьшается разница температур обрабатываемой поверхности и зуба пилы.

На втором и третьем этапе температура поверхности контакта  $T_k$  постоянна. Охлаждение материала трубы от контакта с холодным зубом компенсируется активизацией процесса трения.

Количество тепла, поступающего в зуб пилы из обрабатываемого материала, равно:

$$T_3 = \frac{q_3 \cdot \tau_k \cdot \sqrt{\omega_3}}{2\sqrt{\pi} \cdot \lambda_3 \cdot \sqrt{\tau}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau}\right] \cdot \left(\Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right]\right) \quad (9)$$

где  $\Phi(x, \tau)$  – безразмерная функция ошибок, описывающая распределение температуры по ширине площадки контакта зуба [3];  $x, y$  – координаты точки зуба пилы (см. рис. 2).

На задней поверхности зуба в середине площадки ( $y = 0, \tau = 0, x = l_3/2$ ):

$$T_3 = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau}\right] \cdot \left(\Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}}\right]\right). \quad (11)$$

$$Q_{mp} = Q_3 = q_{mp} \cdot l_z \cdot B \cdot \tau = q_3 \cdot l_3 \cdot B \cdot \tau, \text{ откуда:} \quad (4)$$

$$q_{mp} = q_3 \cdot \frac{l_3}{l_z}. \quad (5)$$

Повышение температуры на задней поверхности зуба пилы (за время контакта,  $\tau = \tau_k$ ) рассчитывается по формуле (7) для мгновенного источника тепла [3, 4]:

$$\Delta T_3 = T_k - T_3 = \frac{q_3 \cdot \sqrt{\omega_3 \cdot \tau_k}}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_3}. \quad (6)$$

Уменьшение температуры обрабатываемой поверхности при контакте с холодным зубом (быстродвижущийся источник тепла) [3,4]:

$$\Delta T_{mp} = T_{cm} - T_k = \frac{4q_{mp} \sqrt{\omega_{mp} \cdot l_3}}{3\lambda_{mp} \sqrt{\pi} \cdot v} \quad (7)$$

Преобразуя выражения (6), (7) и учитывая (5), получим температуру на контактной поверхности в конце рабочего хода в зависимости от температуры зуба при  $\tau = 0$ :

$$T_k = T_3 - \Delta T_3 = \frac{T_{cm} - T_3}{1 + \frac{4\lambda_3 \cdot l_3 \sqrt{\omega_{mp} \cdot l_3}}{3\lambda_{mp} \cdot l_z \cdot \sqrt{\omega_3 \cdot l_z}}} + T_3. \quad (8)$$

Расчет показал, что при врезании холодного зуба  $T_3 = 20$  °С, в горячий материал  $T_{cm} = 1550$  °С, коэффициент температуропроводности материала пилы (сталь 50ХГФА)  $\omega_3 = 0,0000118$  м<sup>2</sup>/с [5]; коэффициент температуропроводности материала трубы (сталь 12Х13)  $\omega_{mp} = 0,0000048$  м<sup>2</sup>/с; коэффициент теплопроводности материала пилы  $\lambda_3 = 41$  Вт/м·град; коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda_{mp} = 30$  Вт/м·град [5]; температура контакта  $T_k = 1383$  °С.

Рассмотрим распределение тепла в зубе пилы как от мгновенного источника ( $Fo \ll 1$ ) на адиабатической поверхности полубесконечного тела [3]:

$$T_3 = \frac{q_3 \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot \sqrt{\omega_3}}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_3} = T_k = 1383. \quad (10)$$

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

Прерывистость процесса пакетной резки выражается в циклическом изменении температуры на поверхности зуба пилы.

При контакте зуба пилы с трубой зуб мгновенно нагревается на величину  $\Delta T_3$ . Во время холостого хода нагрев прекращается, происхо-

дит распределение теплового импульса в теле зуба. Зуб охлаждается обратно пропорционально  $\sqrt{\tau_3}$ , согласно зависимости для полосового неподвижного мгновенного источника тепла [3, 4].

За время одного цикла температура поверхности зуба пилы увеличится на величину:

$$\Delta T_{31} = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau_d}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d}\right] \cdot \left( \Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d}}\right] \right) \quad (12)$$

Аналогичным образом можно рассчитать нагрев поверхности зуба  $\Delta T_{32}$  на следующем обороте пилы за время двух циклов  $2\tau_d$ :

$$\Delta T_{32} = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{2\tau_d}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{8\omega_3 \cdot \tau_d}\right] \cdot \left( \Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{2\omega_3 \cdot \tau_d}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{2\omega_3 \cdot \tau_d}}\right] \right) \quad (13)$$

Каждый последующий оборот  $N$  нагревает поверхность зуба на величину  $\Delta T_{3N}$ . [2]:

$$\Delta T_{3N} = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau_d \cdot N}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}\right] \cdot \left( \Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}}\right] \right) \quad (14)$$

Суммарный нагрев поверхности зуба пилы от всех  $N$  циклов [2]:

$$\Delta T_{3N\Sigma} = \Delta T_{31} + \Delta T_{32} + \Delta T_{33} + \dots + \Delta T_{3N}. \quad (15)$$

Найдем число оборотов (циклов), которая совершает пила при разрезании пакета труб  $\varnothing 42$  мм:

$$N = \frac{n \cdot S_k}{S_m} = \frac{1000 \cdot 680}{600} = 1133,3, \quad (16)$$

где  $n$  – частота вращения пилы, 1000 об/мин;  $S_k$  – длина продольного хода пилы для пакета труб  $\varnothing 42$  мм;  $S_m$  – минутная подача пилы, 600 мм/мин.

Расчет для 11334 циклов показал рост суммарной температуры поверхности зуба на 931,9 °С.

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  $20^\circ$  к оси зуба (рис. 2).

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

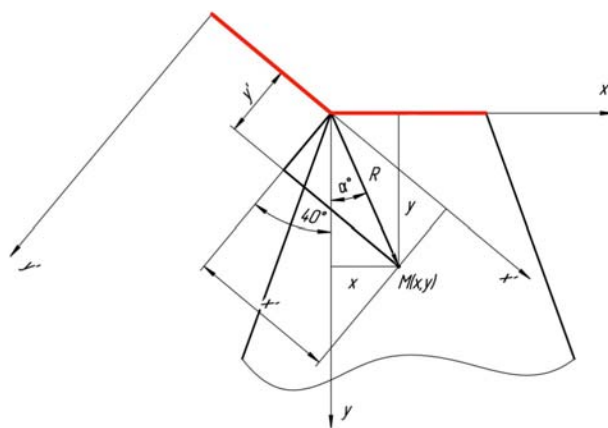


Рис. 2. Система координат зуба пилы и расположение левого фиктивного источника тепла

Температура в точке  $M(x, y)$  складывается из теплового потока на задней границе зуба пилы и двух фиктивных тепловых потоков от отраженных источников. Эти фиктивные источники расположены симметрично основному источнику относительно введенных границ раздела (рис. 2).

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

$$\begin{aligned} x' &= R \cdot \sin\left(40 + \arctg \frac{x}{y}\right) + l_3 = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin\left(40 + \arctg \frac{x}{y}\right) + l_3 \\ y' &= R \cdot \cos\left(40 + \arctg \frac{x}{y}\right) = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\left(40 + \arctg \frac{x}{y}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

Распределение тепла от левого фиктивного источников в момент времени  $\tau$  равно:

$$T_3 = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau}} \cdot \exp \left[ -\frac{\left( \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau} \right] \times \left( \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) + l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] - \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] \right) \quad (18)$$

Аналогично определяются координаты точки  $M$  в системе координат  $(x'', y'')$  для правого фиктивного источника теплоты (рис. 3):

$$\begin{aligned} x'' &= R \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) + l_3 \cdot \cos 40 \\ y'' &= R \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot \sin 40 = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot \sin 40 \end{aligned} \quad (19)$$

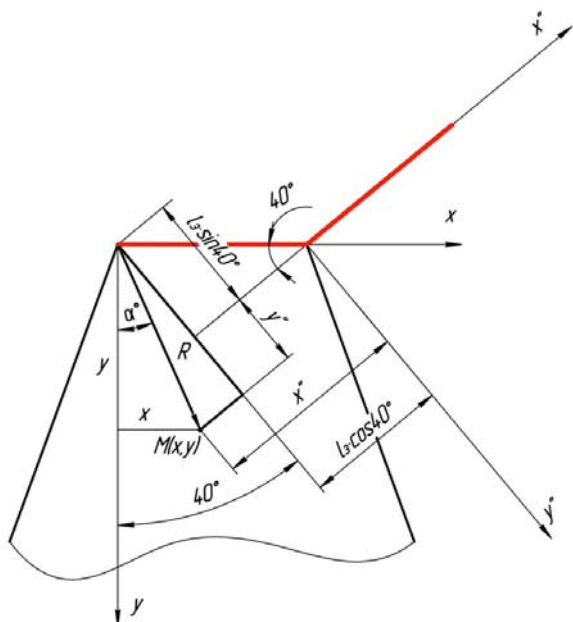


Рис. 3. Система координат зуба пилы и расположение правого фиктивного источника тепла

Температурное поле от правого фиктивного источника подчиняется зависимости:

$$T_3 = \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau}} \cdot \exp \left[ -\frac{\left( \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot \sin 40 \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau} \right] \times \left( \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot (1 - \cos 40)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] - \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot (2 - \cos 40)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] \right) \quad (20)$$

Суммарное тепловое поле можно получить наложением температурных полей от реального и фиктивных источников, складывая формулы (11), (18) и (20):

$$\begin{aligned}
 T_s = & \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau}} \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau} \right] \cdot \left( \Phi \left[ \frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] - \Phi \left[ \frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] \right) + \right. \\
 & + \exp \left[ -\frac{\left( \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau} \right] \times \\
 & \times \left( \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) + l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] - \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] \right) + \\
 & + \exp \left[ -\frac{\left( \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot \sin 40 \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau} \right] \times \\
 & \times \left( \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot (1 - \cos 40)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] - \right. \\
 & \left. - \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot (2 - \cos 40)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau}} \right] \right).
 \end{aligned} \tag{21}$$

Для иллюстрации полученного решения в программе Excel была сформирована расчетная таблица и получено поле распределения температур от нагрева зуба в начале цикла в момент времени  $\tau = 0,006$  с. Распределение температур по высоте зуба показано на рис. 4.

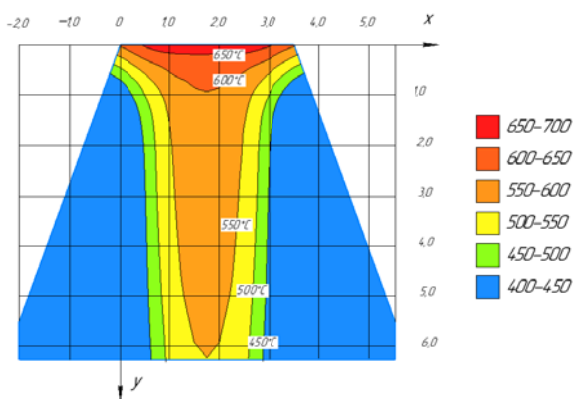


Рис. 4. Температурное поле зуба пилы в начальный момент времени при  $\tau = 0,006$  с

Анализ температурного поля показывает, что зуб пилы в начальный момент испытывает импульсное нагружение. Тепло быстро распространяется в тело пилы.

В середине цикла при  $\tau = 0,03$  с температура задней поверхности уменьшается, боковые поверхности зуба нагреваются. Температурное поле выравнивается (рис. 5).

В конце цикла и холостого хода при  $\tau = 0,06$  с вершина зуба охлаждается до температуры около  $200^\circ\text{C}$ . Затем начинается новый цикл нагрева, зуб пилы входит в контакт с обрабатываемой поверхностью (рис. 6).

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

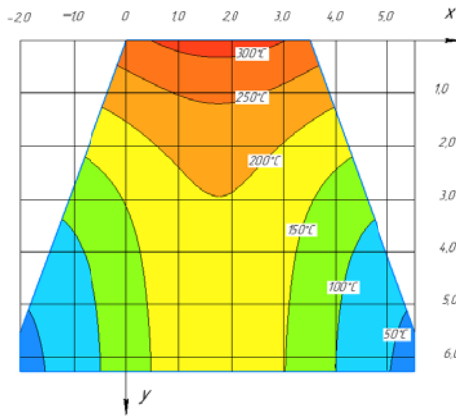


Рис. 5. Температурное поле зуба пилы в момент времени  $\tau = 0,03$  с

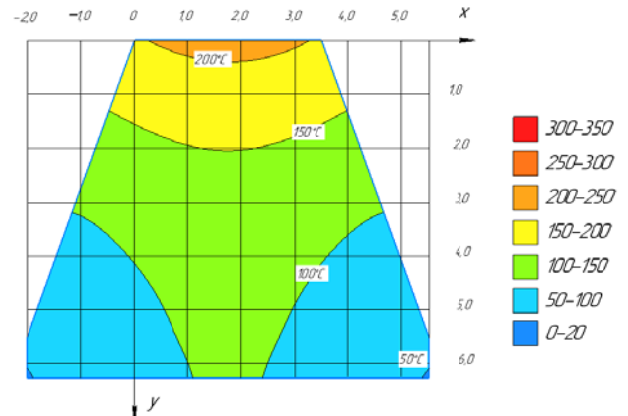


Рис. 6. Температурное поле зуба пилы в конце цикла (один оборот пилы) при  $\tau = \tau_d = 0,06$  с

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{3N} = & \frac{T_k \cdot \sqrt{\tau_k}}{2\sqrt{\tau_d \cdot N}} \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{y^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N} \right] \cdot \left( \Phi \left[ \frac{x}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] - \Phi \left[ \frac{x-l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] \right) + \right. \\
 & + \exp \left[ -\frac{\left( \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 + \arctg \frac{x}{y} \right) \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N} \right] \times \\
 & \times \left( \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 + \arctg \frac{x}{y} \right) + l_3}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] - \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 + \arctg \frac{x}{y} \right)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] \right) + \\
 & + \exp \left[ -\frac{\left( \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \left( 40 - \arctg \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot \sin 40 \right)^2}{4\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N} \right] \times \\
 & \times \left( \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \arctg \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot (1 - \cos 40)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] - \right. \\
 & \left. - \Phi \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \left( 40 - \arctg \frac{x}{y} \right) - l_3 \cdot (2 - \cos 40)}{2\sqrt{\omega_3 \cdot \tau_d \cdot N}} \right] \right) \left. \right\}. \tag{22}
 \end{aligned}$$

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

$$\Delta T_{3N_2} = \Delta T_{3_1} + \Delta T_{3_2} + \Delta T_{3_3} + \dots + \Delta T_{3_N}. \tag{23}$$

Распределение температур по высоте зуба для  $N = 5$  показано на рис. 7. Задняя поверх-

ность зуба пилы нагрелась выше  $500^\circ\text{C}$  на глубины около 1 мм.

Расчет температурного поля для 10 циклов (рис. 8) показал, что задняя поверхность нагревается выше  $700^\circ\text{C}$ , а основание зуба выше  $300^\circ\text{C}$ .

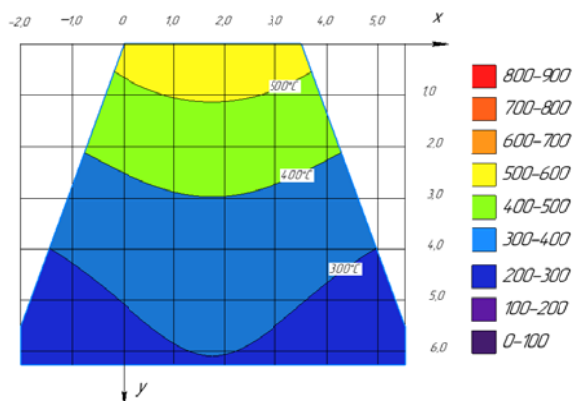


Рис. 7.- Температурное поле зуба пилы после пяти оборотов при  $\tau = 0,3$  с

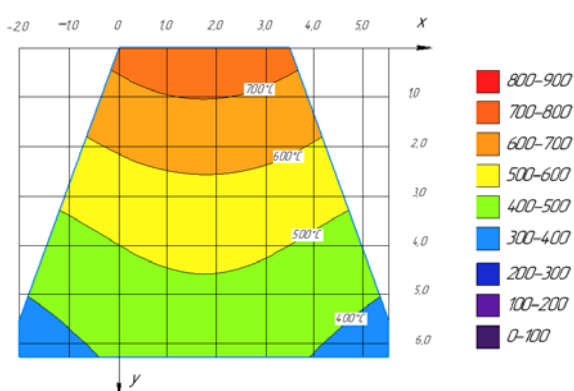


Рис. 8. Температурное поле зуба пилы после десяти оборотов при  $\tau = 0,6$  с

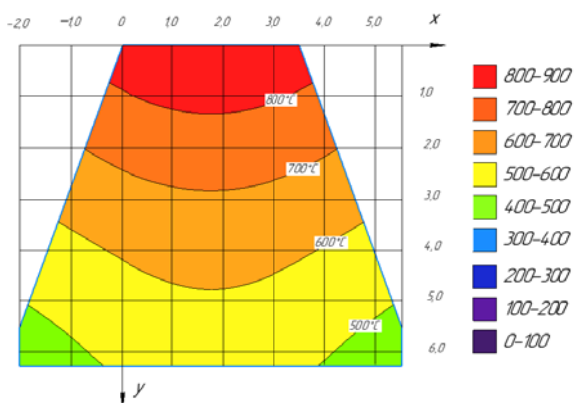


Рис. 9. Температурное поле зуба пилы после пятнадцати оборотов при  $\tau = 0,9$  с

На рис. 9 показано распределение температуры через 15 оборотов пилы. Поверхность контакта нагревается выше 800 °С.

### Выводы

Анализ рассчитанного температурного поля позволяет сделать вывод, что нагрев выше 600–700 °С на глубину более 5 мм от вершины зуба происходит уже на первой секунде реза.

В дальнейшем, с увеличением количества циклов  $N$  (оборотов пилы), интенсивность нагрева снижается, так как с нагревом задней поверхности зуба уменьшается разность температур между ней и обрабатываемой поверхностью. Но из-за большого количества циклов, требуемого для разрезания пакета труб, режущая часть пилы неуклонно нагревается.

Все это приводит к интенсивному деформированию вершины зуба (см. рис. 1) и к потере стойкости инструмента.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Повышение эффективности термофрикционной резки трубопроката / А. И. Банников, А. А. Банников, А. И. Курченко, Н. А. Дятлов, И. Л. Пермяков // СТИН. – 2010. – № 10. – С. 34–37.
2. Банников, А. И. Совершенствование процесса резания горячего металлопроката дисковыми пилами на основе управления теплофизическими явлениями в контактной зоне : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02. 07 / А. И. Банников ; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2018.
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.