

те $f_k = 18000$ Гц и $v_p = 1$ м/с косинус динамического угла наклона режущей кромки достигает значения $\cos \theta_{\text{дин}}(x, t) = 0,55$, что весьма существенно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Перевод с яп. С.Л. Масленникова; Под ред. И.И. Портнова и В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.: ил.
2. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: Учебник для вузов / В. И. Любченко. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: МГУЛ, 2004. – 310 с.: ил.
3. Пат. 2113347 Россия, МКИ 6 В 27 В 1/00, 3/00, 19/00, 23/00. Способ распиловки древесины лезвийным инструментом и устройство для его осуществления. / В. Ф. Гордеев и др. – № 97105166/13; Заявл. 02.04.97; Оpubл. 20.06.98, Бюл. № 17.
4. Пат. 2124984 Россия, МКИ 6 В 27 В 33/10, В 23 D 61/12. Пильное полотно. / В. Ф. Гордеев и др. – № 96122695/ 13; Заявл. 28.11.96; Оpubл. 20.01.99, Бюл. № 2.

О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛОБМЕНЕ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ПИЛЫ ПРИ РЕЗАНИИ

Пашков В.К., Щепочкин С.В. (УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)
art-sit@yandex.ru

ABOUT CONVECTIVE HEAT EXCHANGE OF A CUTTING PARTSAWS AT CUTTING

В работах по исследованиям теплофизической обстановки в зоне резания круглыми пилами, оценки доли тепла, отводимого через инструмент существенно различаются. По результатам экспериментальных исследований [1] через контактные поверхности лезвий зубьев с древесиной на нагрев пил расходуется до 70 % общего количества эквивалентной тепловой мощности при резании. При этом 60...65 % идёт на нагрев режущей части пилы в установившемся тепловом режиме.

Для аналитической оценки количества тепла, расходуемого на нагрев режущей части необходимо знать достоверную информацию о распределении температуры по высоте зуба и коэффициенте теплоотдачи зуба при конвективном теплообмене с окружающей средой.

По нашим исследованиям температурный напор данного сечения зуба по высоте над температурой окружающей среды определяется выражением

$$\Delta t_{\text{cpi}} = \Delta t_0 \frac{e^{-mx_i} U(0,5(1+\nu); 1; 2mx_i)}{e^{\frac{m\rho}{\sin \beta/2}} U\left(0,5(1+\nu); 1; \frac{2m\rho}{\sin \beta/2}\right)}, \quad (1)$$

где Δt_0 – превышение температуры резания над температурой окружающей среды, °С;

e – основание натурального логарифма, $e = 2,71828$;

$U(0,5(1+\nu); 1; 2mx_i)$ – конфлюэнтная (вырожденная) гипергеометрическая функция 3-х аргументов $0,5(1+\nu)$; 1 и $2mx_i$;

β – угол заострения зуба, град.;

x_i – расстояние от вершины зуба до рассматриваемого участка, м;

ρ – радиус затупления лезвия, м;

m и ν – коэффициенты, необходимые для нахождения аргументов гипергеометрической функции, которые соответственно равны

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_{cp}}{\lambda b}}; \quad \nu = \frac{180b}{\pi\beta} \sqrt{\frac{2\alpha_{cp}}{\lambda b}}, \quad (2)$$

где α_{cp} – коэффициент теплоотдачи зуба в окружающую среду, Вт/(м²°С);

λ – коэффициент теплопроводности материала зуба, Вт/(м°С).

b – толщина зуба (пильного диска), м;

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_{cp} при принятых скоростях вращения пил, устойчивом турбулентном перемещении потоков воздуха и его независимости от ширины пропила определяется выражением [2]

$$\alpha_{cp} = 0,0287 \frac{\lambda_f \omega^{0,8} r^{0,6}}{\nu_f^{0,8}}, \quad (3)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности воздуха, $\lambda_f = 2,59 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м°С);

ω – угловая скорость вращения диска, рад/с;

r – радиус пилы, м;

ν_f – кинематическая вязкость воздуха, $\nu_f = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Для определения теплоты, передающейся в окружающую среду режущей частью (зубьями) пилы Q_{OKP} условно зуб пилы разбиваем на кольцевые участки радиусом x_i и шириной Δx (рисунок 1). На каждом из них теплоотдача в окружающую среду определяется по закону Ньютона-Рихмана

$$Q_{OKP} = z \alpha_{cp} \sum_{i=1}^n F_i \Delta t_{cpi}, \quad (4)$$

где z – число зубьев пилы;

F_i – площадь поверхности теплоотдачи участка, м²;

n – количество участков, 1, 2 ... n .

Площадь поверхности теплоотдачи участка определяется из выражений:

$$\text{для } x_i \leq a \quad F_i = 2\Delta x \left(\frac{\pi x_i \beta}{180} + b \right); \quad (5)$$

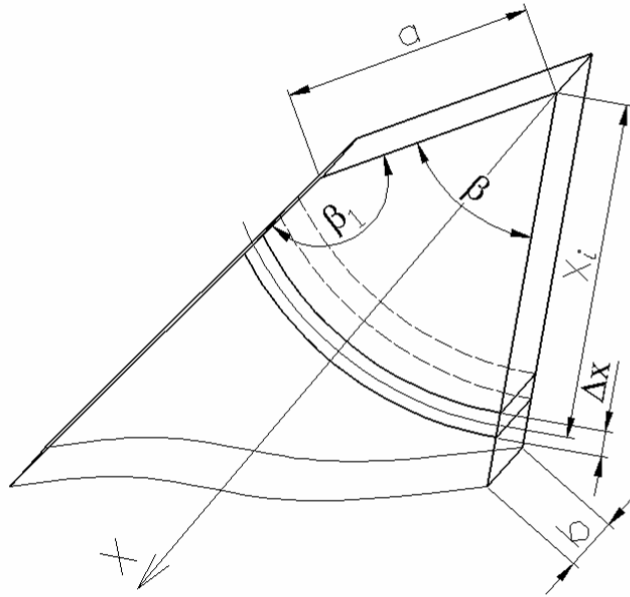


Рисунок 1 – Схема разбивки зуба по высоте на участки

$$\text{для } a \leq x_i \leq h \quad F_i = 2\Delta x \left(\frac{\pi x_i \left(\beta - \left[180 - \beta_1 - \arcsin \left(\frac{a \cdot \sin \beta_1}{x_i} \right) \right] \right)}{180} + b \right), \quad (6)$$

где Δx – ширина кольцевого участка, м;
 x_i – расстояние от вершины зуба до рассматриваемого участка, м;
 β – угол заострения зуба, град.;
 β_1 – вспомогательный угол, град.;
 a – длина задней грани зуба, м;
 b – толщина зуба (пильного диска), м;
 h – высота зуба в направлении биссектрисы угла заострения β , м.
 Подставив выражения (1) и (6) в формулу (4), получим

$$Q_{OKP} = z\Delta t_0 \left[\frac{2\Delta x \alpha_{cp}}{e^{-\frac{m\rho}{\sin \beta/2}} U \left(0,5(1+\nu); 1; \frac{2m\rho}{\sin \beta/2} \right)} \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1}^n e^{-mx_i} U(0,5(1+\nu); 1; 2mx_i) \left(\frac{\pi x_i \left(\beta - \left[180 - \beta_1 - \arcsin \left(\frac{a \cdot \sin \beta_1}{x_i} \right) \right] \right)}{180} + b \right) \right]. \quad (7)$$

Выражение в квадратных скобках формулы (7) обозначим как α_z , Вт/°С. Тогда

$$Q_{\text{ОКР}} = z \Delta t_0 \alpha_z. \quad (8)$$

Величина α_z называется **среднеинтегральным коэффициентом теплоотдачи зуба пилы**. Она численно равна количеству теплоты, передаваемой зубом пилы в окружающую среду при повышении температуры резания на 1 °С в установившемся тепловом режиме.

Рассмотрим пример расчета среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи зуба круглой пилы (ГОСТ 980-80 тип 1, исполнение 1) диаметром $D = 500$ мм, толщиной $b = 2,5$ мм, числом зубьев $z = 60$, при принятом коэффициенте теплопроводности материала зуба $\lambda = 37,8$ Вт/(м °С). Частота вращения пилы $n = 3000$ мин⁻¹ ($\omega = 314$ рад/с).

Для данной пилы, согласно [3] шаг зубьев $t_z = 26,2$ мм, высота зуба составит $h \approx 0,5t_z \approx 13$ мм, длина задней грани зуба $a \approx 0,4t_z \approx 10,5$ мм, угол заострения $\beta = 40^\circ$, угол $\beta_1 \approx 165^\circ$. Радиус затупления лезвия принимаем $\rho = 10$ мкм.

Условно зуб разбиваем на $n = 13$ кольцевых участков (рисунок 1), шириной $\Delta x = 1$ мм. Подставим значения λ_f , ω , r и v_f в формулу (3) и определим средний коэффициент теплоотдачи зуба пилы

$$\alpha_{cp} = 0,0287 \frac{2,59 \cdot 10^{-2} \cdot 314^{0,8} \cdot 0,25^{0,6}}{(15,06 \cdot 10^{-6})^{0,8}} = 231,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Коэффициенты m и ν для принятых значений α_{cp} , λ , b и β соответственно по формулам (2) будут равны

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot 231,9}{37,8 \cdot 0,0025}} = 70,05; \quad \nu = \frac{180 \cdot 0,0025}{3,14 \cdot 40} 70,05 = 0,2508.$$

Первый аргумент гипергеометрической функции U равен $0,5(1+\nu) = 0,5(1+0,2508) = 0,6254$.

Постоянную часть выражения α_z обозначим через P . Она будет равна

$$P = \frac{2\Delta x \alpha_{cp}}{e^{\frac{m\rho}{\sin \beta/2}} U\left(0,5(1+\nu); 1; \frac{2m\rho}{\sin \beta/2}\right)} = \frac{2 \cdot 0,001 \cdot 231,9}{2,71828^{\frac{70,05 \cdot 0,00001}{\sin 20^\circ}} 4,052} = 0,1147.$$

Переменную часть выражения α_z обозначим через S

$$S = \sum_{i=1}^n e^{-mx_i} U(0,5(1+\nu); 1; 2mx_i) \left(\frac{\pi x_i \left(\beta - \left[180 - \beta_1 - \arcsin\left(\frac{a \cdot \sin \beta_1}{x_i}\right) \right] \right)}{180} + b \right).$$

Результаты расчета переменной части выражения α_z приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи зуба пилы

| i | x_i , мм | x_i , м | $z = x \cdot m$ | e^{-z} | $U(0,6254;1;2z)$ | Δt_i | S_i |
|----|------------|----------------------|-----------------|----------|------------------|--------------|-----------|
| 0 | 0,0292 | $2,92 \cdot 10^{-5}$ | 0,0020 | 0,998 | 4,052 | 1,000 | - |
| 1 | 0,5 | 0,0005 | 0,0350 | 0,966 | 2,167 | 0,517 | 0,0059612 |
| 2 | 1,5 | 0,0015 | 0,105 | 0,900 | 1,525 | 0,339 | 0,0048689 |
| 3 | 2,5 | 0,0025 | 0,175 | 0,839 | 1,258 | 0,261 | 0,0044838 |
| 4 | 3,5 | 0,0035 | 0,245 | 0,783 | 1,097 | 0,212 | 0,0042442 |
| 5 | 4,5 | 0,0045 | 0,315 | 0,730 | 0,984 | 0,178 | 0,0040506 |
| 6 | 5,5 | 0,0055 | 0,385 | 0,680 | 0,900 | 0,151 | 0,0038803 |
| 7 | 6,5 | 0,0065 | 0,455 | 0,634 | 0,833 | 0,131 | 0,0037189 |
| 8 | 7,5 | 0,0075 | 0,525 | 0,591 | 0,779 | 0,114 | 0,0035624 |
| 9 | 8,5 | 0,0085 | 0,596 | 0,551 | 0,733 | 0,100 | 0,0034094 |
| 10 | 9,5 | 0,0095 | 0,666 | 0,514 | 0,694 | 0,088 | 0,0032593 |
| 11 | 10,5 | 0,0105 | 0,736 | 0,479 | 0,661 | 0,078 | 0,0031123 |
| 12 | 11,5 | 0,0115 | 0,806 | 0,447 | 0,631 | 0,070 | 0,0028932 |
| 13 | 12,5 | 0,0125 | 0,876 | 0,417 | 0,605 | 0,062 | 0,0026934 |

$$\Sigma S_i = 0,0502$$

Переменная часть выражения α_Z составит $S = 0,0502$, а среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи зуба пилы будет равен

$$\alpha_Z = P \cdot S = 0,1147 \cdot 0,0502 = 5,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/}^\circ\text{С.}$$

В таблице 1 расчеты выполнены для относительных температур по высоте зуба, т.е. их долей от значения температур вершины зуба t_0 , принятой за 1.

Для принятого диапазона значений параметров α_{cp} , β , h , b , β_1 и a , влияющих на величину среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи зуба пилы α_Z , её аналитическая зависимость из формулы (7) аппроксимирована.

Зависимость α_Z от высоты зуба h аппроксимирована полиномом 3-ей степени, а влияние остальных параметров α_{cp} , β , b , β_1 и a аппроксимировано степенной функцией

$$\alpha_Z = 10^{-8} b^{0,7257} \beta^{0,5063} \alpha_{cp}^{0,6385} \beta_1^{0,0715} a^{0,0755} (0,014h^3 - 1,82h^2 + 82,79h + 20,05), \quad (9)$$

где b – толщина зуба (пильного диска), мм;

β – угол заострения зуба, град.;

α_{cp} – коэффициент теплоотдачи зуба в окружающую среду, Вт/(м² °С);

β_1 – вспомогательный угол, град.;

a – длина задней грани зуба, мм;

h – высота зуба в направлении биссектрисы угла заострения β , мм.

Разработанная зависимость (9) позволяет определять среднеинтегральные коэффициенты теплоотдачи зуба, не прибегая к сложному математическому аппарату. Коэффициент корреляции $r = 0,976$.

Таким образом, зная температуру резания, среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи зуба α_Z и число зубьев Z , по формуле (8) можно рассчитать количество теплоты, отводимое режущей частью пилы в окружающую среду теплоотдачей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конов В.Н. Исследование влияния тепловых явлений на работоспособность круглых пил: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 13.00.01/ Конов Виктор Николаевич; ЛТА. – Л., 1979, – 26 с.
2. Пашков В.К. Тепловое поле вращающегося охлаждаемого диска пилы / В.К. Пашков, А.С. Красиков // Деревообрабатывающие станки, инструменты и вопросы резания древесины. – Л.: ЛТА, 1984, С. 48 – 51.
3. Библиографическое описание документа: ГОСТ 980-80. – Взамен ГОСТ 980-69; введ. 01.01.1982. – М., 1999. – 25 с.

ОБ ОЦЕНКЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ПИЛЕНИИ КРУГЛЫМИ ПИЛАМИ

Щепочкин С.В. (УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) art-sit@yandex.ru

ABOUT AN ESTIMATION OF CUTTING TEMPERATURE AT SAWING BY CIRCULAR SAWS

Установление законов распределения и численных значений температур на контактных поверхностях инструмента важная задача теплофизики резания. С этими законами связаны износ и стойкость режущих кромок и поверхностей лезвия, термические напряжения в инструменте, область режимов, при которых целесообразно использовать инструментальные материалы с той или иной степенью температурной устойчивости.

Под температурой резания понимается температура на контактных поверхностях инструмента при резании при установившемся теплообмене.

Для определения температуры резания необходимо знать количество теплоты, поступающей по зонам круглой пилы в процессе резания. Выделим две таких зоны (рисунок 1). Первая – режущая часть (зубья пилы), вторая – пильный диск (без зубьев).

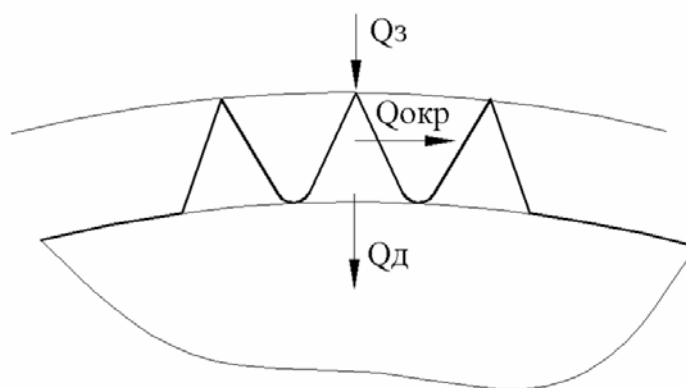


Рисунок 1 – Схема тепловых потоков по зонам круглой пилы