



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 630*3.331

В.К. Пашков, С.В. Щепочкин

Пашков Валентин Кузьмич родился в 1933 г., окончил в 1955 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры станков и инструментов Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет около 300 печатных работ в области теплофизики резания древесины.



Щепочкин Сергей Владимирович родился в 1981 г., окончил в 2003 г. Уральский государственный лесотехнический университет, старший преподаватель кафедры станков и инструментов Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет около 20 печатных работ в области теплофизики резания древесины.



ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ЗУБА КРУГЛОЙ ПИЛЫ

Выполнены аналитические расчеты распределения температуры по высоте зуба круглой пилы; показано, что характер ее распределения аналогичен установленному экспериментальным путем.

Ключевые слова: круглая пила, диск, зуб, температура.

Разработка аналитических методов расчета и распределения температур на контактных поверхностях лезвия зуба пилы и по его высоте – важная задача теплофизики резания круглыми пилами. Решение этой задачи позволяет разрабатывать рекомендации, связанные с износом и стойкостью режущих кромок и поверхностей лезвия, термическими напряжениями в инструменте, назначением режимов резания, при которых целесообразно использовать инструментальные материалы с той или иной степенью температурной устойчивости.

Аналитические исследования невозможно выполнить без некоторой схематизации теплопередачи при движении стружки по лезвию зуба и лезвия по поверхности резания [4].

В цилиндрической системе координат r , φ , z , связанной с источником тепла, дифференциальное уравнение теплопроводности в общем случае имеет следующий вид:

$$\left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] + \left[\left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 \right] \frac{\partial \lambda}{\partial t} =$$

$$= C_V \left[\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial t}{\partial r} + V_\varphi \frac{\partial t}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial t}{\partial z} \right], \quad (1)$$

где $t(r, \varphi, z, \tau)$ – температура рассматриваемого тела в точке с координатами r, φ, z в момент времени τ ;

C_V – объемная теплоемкость;

V_r, V_φ, V_z – радиальная, тангентальная и осевая составляющие вектора скорости тела относительно источника тепла;

$\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности материала тела.

Решение уравнения теплопроводности (1), как и всякого нелинейного дифференциального уравнения в частных производных, представляет значительные трудности. Поэтому важнейшим этапом теплофизического анализа является упрощение структуры уравнения (1) на основе схематизации рассматриваемого процесса.

Применительно к задаче о нагреве режущей части пилы, вращающейся вокруг оси z , когда $V_r, V_z = 0$, целесообразно и по имеющимся сведениям допустимо считать ее температурное поле плоским $\frac{\partial t}{\partial z}; \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$

(вследствие малой толщины диска), осесимметричным $\frac{\partial t}{\partial \varphi}; \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0$ (в диа-

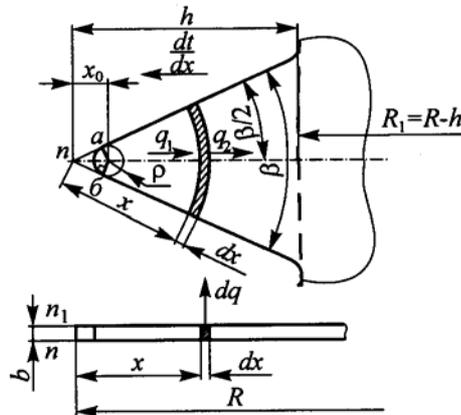
пазоне скоростей резания в деревообработке [1, 5]) и стационарным $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$

(при межторцовых разрывах, не превышающих 10 % длины распиливаемых заготовок [6]). Кроме того, при принятом стационарном температурном поле влиянием температуры диска на теплофизические свойства его материала можно пренебречь [4].

Потеря теплоты лезвиями зубьев от лучеиспускания не превышает, по данным работы [2], 1,0 ... 1,5 % от общего количества теплоты, поступающей в инструмент и участвующей в теплообменных процессах с окружающей средой.

С учетом перечисленных ограничений и теплоотдачи по боковым поверхностям и поверхностям передней и задней граней лезвия зуба пилы рассмотрим тепловой баланс элементарного кольцевого слоя с внутренним радиусом x и центром в точке n режущей кромки mn_1 абсолютно острого лезвия шириной dx (рис. 1). На профиль абсолютно острого лезвия наложен профиль физического лезвия, имеющий радиус закругления ρ и режущую кромку в форме дуги ab с центром O .

Рис. 1. Схема тепловых потоков элементарного участка зуба пилы



Обозначения, использованные на рис. 1: $\frac{dt}{dx}$ – градиент температуры зуба по высоте; q_1 и q_2 – количество подводимой и отводимой теплоты от элементарного участка за счет теплопроводности по высоте зуба, Вт; dq – количество теплоты, отводимой за счет конвективного теплообмена от элементарного участка через переднюю, заднюю и боковые грани, Вт; β – угол заострения зуба, град; h и b – высота и толщина зуба, м; R и R_1 – радиус пилы и окружности впадин зубьев, м; x_0 – расстояние от начала координат (т. n) до центра дуги ab (т. O).

Поскольку в установившемся режиме резания теплосодержание элементарного участка остается постоянным, тепловой поток dq , рассеиваемый за счет конвекции боковыми поверхностями и поверхностями передней и задней граней этого участка, определяется разницей тепловых потоков q_1 и q_2 , проходящих через внешнюю и внутреннюю цилиндрические поверхности:

$$dq = q_1 - q_2. \quad (2)$$

Члены правой части выражения (2) представляют следующее:

$$q_1 = -2\pi x b \frac{\beta}{360} \lambda \frac{dt}{dx}; \quad (3)$$

$$q_2 = -2\pi(x + dx)b \frac{\beta}{360} \lambda \frac{d}{dx}(t + dt). \quad (4)$$

Подставив тепловые потоки (3) и (4) в выражение (2) и проведя преобразования, получим

$$dq = \frac{\lambda \pi \beta b}{180} \left(x \left(\frac{d}{dx}(t + dt) - \frac{dt}{dx} \right) + dx \frac{d}{dx}(t + dt) \right). \quad (5)$$

По теореме Лагранжа

$$\frac{d}{dx}(t + dt) - \frac{dt}{dx} = \frac{d^2 t}{dx^2} dx. \quad (6)$$

С учетом (6), выражение (5) примет следующий вид:

$$dq = \frac{\lambda\pi\beta b}{180} \left(x \frac{d^2t}{dx^2} + \frac{dt}{dx} \right) dx. \quad (7)$$

С другой стороны, количество теплоты, отводимой за счет конвективного теплообмена от элементарного участка, определим по закону Ньютона–Рихмана:

$$dq = 2\alpha \left(\frac{x\pi\beta}{180} + b \right) (t - t_b) dx, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

t – температура элементарного участка, °С;

t_b – температура окружающего воздуха, принята $t_b = 0$ °С.

Подставив количество теплоты, отводимой за счет конвективного теплообмена по формуле (8), в выражение (7) и проведя преобразования, получим

$$\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt}{dx} - \frac{2\alpha}{\lambda b} t \left(1 + \frac{180b}{x\pi\beta} \right) = 0. \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$\frac{2\alpha}{\lambda b} = m^2; \quad mx = z; \quad \frac{180b}{\pi\beta} m = v.$$

Тогда

$$\frac{1}{x} = \frac{m}{z}; \quad \frac{dt}{dx} = m \frac{dt}{dz}; \quad \frac{d^2t}{dx^2} = m^2 \frac{d^2t}{dz^2}. \quad (10)$$

Дифференциальное уравнение (9) с учетом (10) примет вид

$$\frac{d^2t}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dt}{dz} - \left(1 + \frac{v}{z} \right) t = 0. \quad (11)$$

Запишем решение дифференциального уравнения (11) с применением программного пакета Mathematica v. 4.2:

$$t = C_1 e^{-z} U(0,5(1+v); 1; 2z) + C_2 e^{-z} L(0,5(-1-v); 2z), \quad (12)$$

где C_1 и C_2 – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий;

$U(0,5(1+v); 1; 2z)$ – конфлюэнтная (вырожденная) гипергеометрическая функция первого рода, порядка $(1+v)$, аргумента $2z$;

$L(0,5(-1-v); 2z)$ – функция Лагерра порядка $0,5(-1-v)$, аргумента $2z$.

Постоянные коэффициенты C_1 и C_2 в выражении (12) определим из граничных условий первого рода.

Для случая реального резца считаем, что температура будет максимальной на расстоянии $x_0 = \frac{\rho}{\sin \frac{\beta}{2}}$ от начала координат (рис. 1) и равна t_0 .

Тогда при $x = x_0$ и $t = t_0$ выражение (12) примет вид

$$t_0 = C_1 e^{-mx_0} U(0,5(1+v); 1; 2mx_0) + C_2 e^{-mx_0} L(0,5(-1-v); 2mx_0), \quad (13)$$

а при $x = \infty$ и $t = 0$:

$$0 = C_1 e^{-\infty} U(0,5(1+v); 1; \infty) + C_2 e^{-\infty} L(0,5(-1-v); \infty). \quad (14)$$

Так как при $x = \infty$ функция Лагерра $L(0,5(-1-v); \infty) = \infty$, выражение (14) справедливо лишь при условии $C_2 = 0$. Тогда из (13)

$$C_1 = \frac{t_0}{e^{-mx_0} U(0,5(1+v); 1; 2mx_0)}.$$

При известных коэффициентах C_1 и C_2 , и x_0 закон распределения температуры по высоте зуба можно записать в виде

$$t = t_0 \frac{e^{-mx} U(0,5(1+v); 1; 2mx)}{e^{-\frac{m\rho}{\sin \frac{\beta}{2}}} U\left(0,5(1+v); 1; \frac{2m\rho}{\sin \frac{\beta}{2}}\right)}. \quad (15)$$

График конфлюэнтной (вырожденной) гипергеометрической функции первого рода приведен на рис. 2, график распределения температуры (кривая 1) по высоте зуба – на рис. 3. Как видно из формулы (15), характер распределения температуры не зависит от ее абсолютного значения на лезвии зуба, поэтому на рис. 3 по оси ординат приведена относительная температура.

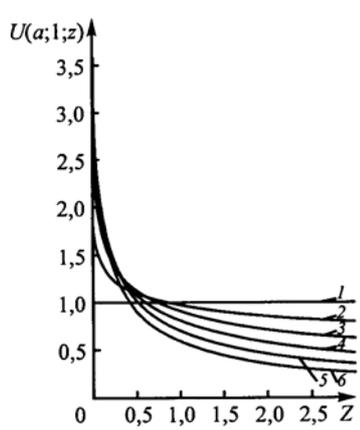


Рис. 2. Изменение конфлюэнтной (вырожденной) гипергеометрической функции первого рода аргумента z , порядка a : 1 – $a = 0$; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – 1,0

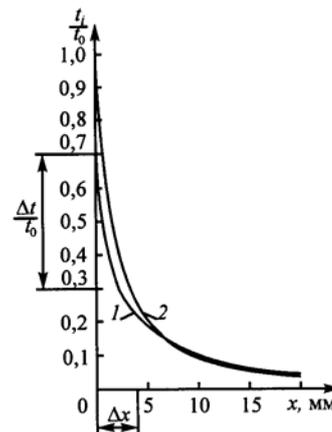


Рис. 3. Распределение относительной температуры по высоте зуба: 1 – кривая, построенная по формуле (15); 2 – графоаналитическим методом [3]

Выводы

1. Характер изменения относительной температуры по высоте зуба, полученный аналитическим расчетом (кривая 1) хорошо согласуется с результатами решения обратной задачи для тех же условий резания графоаналитическим методом (кривая 2). Это позволяет сделать заключение, что установлена реальная картина стационарного температурного поля зуба режущей части пилы.

2. Аналитический метод расчета температур зуба рекомендуется для случая, когда известна температура резания, графоаналитический метод – при известной температуре диска на окружности впадин зубьев.

3. Градиенты температур по высоте зуба (кривые 1, 2) наиболее отличаются в отрезках координат по оси абсцисс $\Delta x = 0 \dots 4$ мм; $\Delta t/t_0 = 0,3 \dots 0,7$. Это можно объяснить допущениями, сделанными при описании теплофизической обстановки в зоне резания для разработки аналитического метода, не учитывающего закрытый процесс резания, наличие теплых опилок, теплообмен лучеиспусканием. Необходимо отметить, что градиент температур на холостой ветви пилы выше, чем на рабочей.

4. Ошибка определения температуры основания зуба аналитическим методом, принятая при расчете температуры резания, не превышает 6 %. Можно сделать заключение о достаточной точности реальной температуры на периферии диска и возможности ее использования для расчета режимов резания по динамической устойчивости пилы.

5. Предложенный метод расчета температур зуба позволяет научно обоснованно рекомендовать ограничения параметров режима резания круглыми пилами с учетом материала лезвия зуба и вида отпуска, принятого в технологии его изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абельский, Ш.Ш.* О температурном поле вращающихся гибких дисков [Текст] / Ш.Ш. Абельский, В.К. Пашков // Инженерно-физический журнал. – Т. XX, № 2. – С. 338–343.
2. *Конов, В.Н.* Исследование влияния тепловых явлений на работоспособность круглых пил [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 13.00.01/ Конов Виктор Николаевич; ЛТА. – Л., 1979. – 26 с.
3. *Пашков, В.К.* Аналитический метод расчета температурного поля зуба круглой пилы [Текст] / В.К. Пашков, С.В. Щепочкин // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2003. – С. 128–130.
4. *Резников, А.Н.* Теплофизика резания [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
5. *Hauptmann, E.* Temperature Distribution in a Thin Rotating Disk [Text] / E. Hauptmann, H. Ramsey // Appl. Sii. Res., 1969. – 120 p.

6. *Kalitzin, G.* Erulärmung und Warmes pannungungen des Krejssage blattes [Text] / G. Kalitzin // Holzindustrie. – 1956. – N 11. – P. 269–292.

Уральский государственный
лесотехнический университет

Поступила 21.08.06

V.K. Pashkov, S.V. Shchepochkin

Ural State Forest-Technical University

Temperature Field of Circular Saw Tooth

Analytical calculations are carried out for temperature distribution according to height of circular saw tooth. The character of distribution is shown to be similar to the one set experimentally.

Keywords: circular saw, disc, tooth, temperature.
