№ 1 ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ 1985

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.023

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РЕЖУЩЕМ ЭЛЕМЕНТЕ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

О. П. АФАНАСЬЕВ, Г. А. ЗОТОВ, С. П. РАЗУВАЕВ

Московский лесотехнический институт

По современным представлениям, нагрев резца происходит в результате работы сил трения в зоне его контакта со стружкой и обрабатываемой заготовкой, а отвод — за счет теплопроводности от вершины резца к его периферии и вследствие лучистого теплоиспускания и конвективного теплообмена с воздухом. Оценки показывают, что решающим является отвод тепла теплопроводностью. Если температура связанного с корпусом инструмента основания режущего элемента поддерживается постоянной, то задачу можно сформулировать следующим образом.

Имеется цилиндрическая область, ограниченная дугами радиусов R_1 и R_2, с углом раствора, равным углу заострения резца β. Из центра через границу $r = R_1$ поступает тепловой поток Q, мощность которого равна мощности сил трения. На границе $r = R_2$ поддерживается заданная температура, приблизительно равная 300 К. Тепловыделением на обоих торцах режущего элемента пренебрегаем.

Рассмотрим установившийся процесс. В этом случае уравнение теплопроводности переходит в уравнение Лапласа $\Delta T = 0$ (где T — абсолютная температура). В цилиндрических координатах оператор Лапласа имеет вид [4]

$$\Delta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}. \qquad (1)$$

Считаем, что температура зависит только от координаты r, что имеет место при незначительном теплообмене режущего элемента с воздухом. Тогда получим

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}\left(r \frac{dT}{dr}\right) = 0,$$

откуда

$$r \frac{dT}{dr} = C_1.$$

Константу C_1 определим из условий на внутренней границе. Тепловой поток Q связан с градиентом температуры известным соотношением

$$Q = -\lambda S \operatorname{grad} T = -\lambda S \frac{dT}{dr},$$

где λ — коэффициент теплопроводности;
S — площадь.

Знак «—» показывает, что тепловой поток направлен от нагретых областей к холодным. Очевидно, $S = r \beta b$. Если все величины, как это принято в науке о резании, отнести к единице ширины стружки, то тепловой поток, Вт/м:

$$Q_1 = -\lambda\beta r \frac{dT}{dr}.$$

На границе $r = R_1$ тепловой поток при известной мощности сил трения считаем заданным. Следовательно,

$$R_1 \frac{dT}{dr} = -\frac{Q_1}{\lambda\beta} = C_1.$$

С учетом изложенного, получаем

$$\int_T^{T_0} dT = -\frac{Q}{\lambda\beta} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r}.$$

Отсюда

$$T - T_0 = -\frac{Q}{\lambda\beta} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

и, следовательно,

$$R_1 = R_2 \mathrm{e}^{-\frac{(T - T_0)\lambda\beta}{Q}}. \qquad (2)$$

Формула (2) описывает распределение температур в резце. Для численной оценки примем $\lambda = 45{,}4$ Вт/м·К, $\beta \approx 0{,}5$ рад (30°), $Q_1 = 1000$ Вт/м, перепад температур $T - T_0 = 250$ К. При этих условиях положение границы с $T = 250$ °С определяется соотношением $R_1 \approx 2 \cdot 10^{-3}\ R_2$. Если принять, что на расстоянии 10 мм от вершины режущего элемента температура равна температуре окружающего воздуха, то в области $0 < r < 20$ мкм режущий элемент нагрет свыше 250 °С. Из данной оценки следует, что весь тепловой поток, возникающий в зоне резания, можно отвести теплопроводностью при сравнительно малых (до 250 °С) температурах в самой нагретой области режущего элемента, соизмеримой с радиусом затупления. При таких температурах лучистая теплоотдача незначительна.

При прерывистых процессах, преобладающих при резании древесины, тепловой поток можно считать стационарным только на некотором удалении от вершины режущего элемента. Для исследования распределения температур вблизи лезвия необходимо использовать нестационарное уравнение теплопроводности

$$\Delta T - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \qquad (3)$$

где $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$ — температуропроводность;
c — теплоемкость;
ρ — плотность материала режущего элемента.

Для стали $a = 3{,}4 \cdot 10^{-3}$ м·с$^{-\frac{1}{2}}$; $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Известно решение уравнения (3) для следующих условий: вдоль оси цилиндра бесконечно большого радиуса мгновенно выделяется энергия $\overline{Q}_1$. Если из цилиндра двумя радиальными плоскостями вырезать область с углом β, то она подобна режущему элементу с углом заострения β. Ясно, что распределение температуры в резце такое же, как и в цилиндре, если только энергия, выделяемая на оси цилиндра, в $\frac{2\pi}{\beta}$ раз больше, чем энергия на лезвии резца. С учетом сказанного, решение для цилиндра [3] можно записать в виде:

$$T(r,\ t)=\frac{\overline{Q}_1}{c\rho}\cdot\frac{1}{2\beta a^2 t}\,e^{-\frac{r^2}{4a^2t}}. \tag{4}$$

Данная формула позволяет оценить температурный режим режущего элемента после воздействия вблизи лезвия одиночного теплового импульса, возникающего при срезе одной стружки. В таблице (числитель дроби) приведены результаты расчетов температур в разные моменты времени и на различных расстояниях от лезвия. При расчете мощность теплового импульса $\overline{Q}_1$ принята равной 10 Дж/м, температура окружающего воздуха $T_0 = 20$ °С.

Следовательно, температура нагрева режущего элемента пропорциональна энергии импульса, т. е. произведению мощности сил резания на длительность среза одной стружки. Нагрев режущего элемента на расстоянии до 0,1 мм от лезвия даже одиночным импульсом весьма существен. Для энергии импульса 10 Дж/м при частоте следования импульсов 50 Гц подъем средней температуры резца составляет примерно 100 °С в 1 с. На расстоянии более 1 мм от лезвия процесс нагрева практически непрерывный.

Следует отметить, что, несмотря на приблизительный характер приведенных оценок, они довольно хорошо согласуются с немногочисленными экспериментальными данными по температуре нагрева режущего элемента при резании древесины [2].

Наряду с определением теплового воздействия на резец одиночного импульса представляет интерес распределение температур на некотором удалении от лезвия при непрерывном воздействии источника постоянной мощности $\dot{Q}$, Вт/м. Для всего резца аналогичная схема приемлема для описания нагрева при непрерывных процессах резания (лущение, сверление, точение). Рассуждая как и в предыдущем случае, приходим к выводу, что для вычисления температуры в этом случае необходимо проинтегрировать формулу (4) по времени в предположении, что в каждый интервал времени dt выделяется энергия $d\overline{Q} = \dot{Q}dt$. Тогда получим [3]

$$T(r,\ t)=\frac{\dot{Q}}{2c\rho\beta a^2}\int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4a^2(t-t')}}}{t-t'}\,dt'. \tag{5}$$

Предполагается, что источник начинает действовать с момента времени $t' = 0$ и действует непрерывно до момента времени $t' = t$. Для вычисления интеграла в формуле (5) используем подстановку $-\frac{r^2}{4a^2(t-t')} = x$, тогда

$$-\frac{r^2\,dt'}{4a^2(t-t')^2}=dx;\quad \frac{dt'}{t-t'}=\frac{dx}{x}.$$

В результате формулу (5) можно переписать в виде

$$T(r,\ t)=\frac{\dot{Q}}{2c\rho\beta a^2}\int_{-\frac{r^2}{4a^2t}}^{-\infty}\frac{e^x}{x}\,dx=-\frac{\dot{Q}}{2c\rho\beta a^2}E_i\left(\frac{r^2}{4a^2t}\right). \tag{6}$$

Здесь E_i — интегральная показательная функция [1].

Результаты вычислений температуры по формуле (6) представлены в таблице (знаменатель дроби) в предположении, что мощность сил трения $\dot{Q} = 1$ кВт/м, а остальные данные совпадают с использованными при вычислении температуры по формуле (4).

Расстояние от лезвия r, мм	Температура резца T, °C, через продолжительность времени t, с						
	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}	1,0	10,0
0,01	—	—/154	—/209	—	—/262	—/317	—/375
0,03	100,0/—	257,0/102	44,0/157	28,0/—	22,4/212	—/268	—/319
0,10	92,0/—	213,0/49	44,0/99	28,0/—	22,4/154	—/209	—/262
0,30	62,0/—	54,0/33	40,0/50	28,0/—	22,4/102	—/157	—/212
1,00	20,0/—	20,0/20	20,2/30	20,4/—	22,0/49	—/99	—/154
3,00	—	—/20	—/20	—	—/33	—/50	—/102

Из приведенных расчетов следует, что при средней мощности трения 1 кВт/м лезвие резца за несколько секунд нагревается до 300—350 °C, а далее температура растет очень медленно. Даже если в дальнейшем не учитывать охлаждение из-за теплообмена с воздухом, то за следующие 100 с температура возросла бы всего на 50°. Вследствие теплообмена эта прибавка еще меньше. Следовательно, при указанной мощности сил трения резец не нагревается до температур, при которых существенно меняются механические свойства инструментальных сталей. В этом случае нагрев не должен существенно сказываться на интенсивности износа резца. Если же мощность сил трения возрастет хотя бы вдвое, то температура вблизи лезвия тоже почти удвоится и достигнет рубежа, при котором меняются механические свойства стали, а следовательно, может иметь место ускоренный износ инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1973. — 735 с. [2]. Моисеев А. В. Износостойкость дереворежущего инструмента. — М.: Лесн. пром-сть, — 1981. — 112 с. [3]. Положий Г. Н. Уравнения математической физики. — М.: Высш. школа, 1964. — 186 с. [4]. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1972, с. 729.

Поступила 4 июня 1984 г.

УДК 674.093.2

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЫХОД ЧЕРНОВЫХ ЗАГОТОВОК

Л. С. СУРОВЦЕВА

Архангельский лесотехнический институт

Пиломатериалы в чистом виде, без последующей обработки, практически не используют. Полуфабрикаты, в основном, применяют в строительстве, для производства тары, мебели, деталей авто-, машино-, ва-