

УДК 674.05+621.9

**С. В. Щепочкин**, кандидат технических наук, доцент (УГЛТУ, г. Екатеринбург, Россия);  
**В. К. Пашков**, кандидат технических наук, профессор (УГЛТУ, г. Екатеринбург, Россия)

### РЕЖИМЫ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В КРУГЛОПИЛЬНЫХ СТАНКАХ ПО КРИТЕРИЮ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛА ИНСТРУМЕНТА

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению среднего значения коэффициента теплоотдачи зуба, распределению температуры по его высоте и зависимости температуры резания от мощности резания. Значения коэффициентов теплоотдачи зубьев пилы определены методом полного факторного эксперимента. Разработаны формулы для расчета скорости подачи в круглопильных станках с учетом температуры резания для продольного и поперечного пиления древесины. Применение режимов пиления круглыми пилами по теплостойкости материала инструмента позволит уменьшить аварийный расход круглых пил, оптимизировать режимы пиления, снизить затраты на подготовку инструмента.

The results of pilot studies on determination of average value of tooth heatreturn factor, the temperature distribution on its height and dependence of cutting temperature on cutting capacity are given. Heatreturn factors values of saw teeth are de-fined by a method of complete factorial experiment. Formulas are developed for calculation of giving speed in circular saw machines taking into account cutting temperature for a longitudinal and cross-section cutting of wood. Application of cutting modes by circular saws on heat resistance of a material of the tool will allow to re-duce an emergency expense of round saws, to optimize cutting modes, to lower costs of tool preparation.

**Введение.** Механическая работа эквивалентно превращается в тепловую энергию, которая вызывает нагрев инструмента. Исследования, выполненные в работе [1], показали, что температура резания в зоне контакта лезвия с заготовкой достигает значений, которые могут вызвать тепловую посадку материала лезвия. В связи с этим температуру лезвия в области микрослоев, прилегающих к режущей кромке, необходимо включить в руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами (РТМ) [2] в качестве еще одного ограничения при назначении режима резания.

**Основная часть.** Зависимость температуры резания от мощности резания рассмотрена в работе [1] и определяется выражением

$$t_0 = \frac{\beta_n N_{\text{рез}} K_1}{z \alpha_z + K_2 \alpha_p}, \quad (1)$$

где  $\beta_n$  – коэффициент, учитывающий периодичность процесса резания;  $N_{\text{рез}}$  – мощность резания, Вт;  $K_1$  – коэффициент доли мощности на резание, идущей на нагрев инструмента,  $K_1 = 0,10 \dots 0,45$ ;  $z$  – число зубьев пилы;  $\alpha_z$  – среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи зуба пилы, Вт/°С;  $\alpha_p$  – среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи диска, Вт/°С;  $K_2$  – коэффициент, равный отношению температуры на периферии диска (окружности межзубовых впадин) к температуре резания,  $K_2 = 0,025 \dots 0,100$ .

Коэффициент  $\beta_n$ , учитывающий периодичность процесса резания, определяется из выражения

$$\beta_n = \frac{(\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}})}{360}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{\text{ВХ}}$ ,  $\varphi_{\text{ВЫХ}}$  – углы входа зуба в распиливаемый материал и выхода из него, град/

Для практических расчетов рекомендуется принять значения коэффициентов  $K_1 = 0,30$ ;  $K_2 = 0,05$ . Расчет среднеинтегральных коэффициентов  $\alpha_z$  и  $\alpha_p$  подробно рассмотрен в работах [3] и [4] соответственно.

Среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи зуба пилы, Вт/°С, определяется из выражения

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

где  $B$  – толщина зуба (пильного диска), мм;  $\beta$  – угол заострения зуба, град;  $\alpha_{\text{cp}}$  – средний коэффициент теплоотдачи зубьев пил, Вт/(°С·м<sup>2</sup>);  $\beta_1$  – вспомогательный угол, град,  $\beta_1 \approx 165^\circ$  – для зубьев с ломаной задней поверхностью,  $\beta_1 = 180^\circ$  – для зубьев с прямолинейной задней поверхностью;  $a$  – длина задней грани зуба, мм,  $a \approx 0,025D$  – для зубьев с ломаной задней поверхностью,  $a \approx t$  – для зубьев с прямолинейной задней поверхностью;  $h$  – высота зуба в направлении биссектрисы угла заострения  $\beta$ , мм.

Среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи диска, Вт/°С, без принудительного охлаждения определяется по формуле

$$\alpha_p = 1,88 \cdot 10^{-3} D^{0,96} V^{0,426} B^{0,471}, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр пилы, мм;  $V$  – скорость резания, м/с;  $B$  – толщина диска, мм.

Скорость подачи  $V_S$ , м/мин, и мощность на резание  $N_{рез}$ , кВт, согласно методике [2], связаны следующими выражениями [2, формулы (2.14)–(2.16), с. 25]. Для продольного пиления с толщиной стружки  $a_c \geq 0,1$  мм

$$V_{S(N)} = \frac{6 \cdot 10^4 N_{рез} - a_p p b_1 z_{пил}}{a_n a_w a_b H \cdot 10^3 \sin \theta_{cp}}, \quad (5)$$

где  $N_{рез}$  – мощность на резание одной пилой, кВт;  $\eta$  – КПД главного привода;  $z_{пил}$  – число пил, шт.;  $a_n$  – коэффициент, учитывающий породу древесины, для сосны  $a_n = 1$ , для березы  $a_n = 1,25$ ;  $a_w$  – коэффициент, учитывающий влажность древесины; при влажности 8–12%  $a_w = 1,0$ ; при 25–30%  $a_w = 1,08$ ;  $a_b$  – коэффициент, учитывающий вид пиления;  $a_b = 1,1$  – для попутного резания,  $a_b = 1,0$  – для встречного;  $a_p$  – коэффициент, учитывающий влияние затупления; для острых резцов  $a_p = 1,0$ ; для затупленных  $a_p = 2,0$ ;  $p$  – удельная касательная сила по задней грани, Н/мм. В формуле (3) нужно знать значение коэффициента теплоотдачи режущей части  $\alpha_{cp}$ . Для оценки количества теплоты, отводимой зубьями пил, на кафедре станков и инструментов УГЛТУ поставлен специальный эксперимент по определению численного значения среднего коэффициента теплоотдачи зубьев пил  $\alpha_{cp}$  в зависимости от толщины зуба  $b$ , скорости воздушных потоков  $V$ , мощности теплового источника  $Q$ . Исследования среднего коэффициента теплоотдачи зубьев пил  $\alpha_{cp}$ , Вт/(°С·м<sup>2</sup>) проводились методом полного факторного эксперимента ПФЭ 2<sup>k</sup> на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Диапазоны варьирования переменных факторов в эксперименте были приняты: для толщины зуба  $2,2 \leq b \leq 3,6$  мм, для скорости охлаждающего воздуха  $25 \leq V \leq 50$  м/с, для мощности теплового источника  $10 \leq Q \leq 15$  Вт. Постоянные факторы и их уровни: угол заострения  $\beta = 40^\circ$ , высота зуба  $h = 35$  мм, ширина контактной площадки (рис. 2)  $l_k = 3,5$  мм, материал зуба – сталь 9ХФ.

На схеме экспериментальной установки (рис. 1) обозначено: 1, 3 – соединительный кабель; 2 – шаговый электродвигатель; 4 – жесткая муфта; 5 – персональный компьютер; 6 – коническая передача; 7 – винтовая передача; 8 – инфракрасный пирометр Mikron M120; 9, 10 – исследуемые зубья пилы (модели), нижний и верхний соответственно; 11 – анемометр; 12 – термопара хромель-алюмелевая; 13 – измеритель температуры CENTER 308; 14 – патрубок от установки охлаждения; 15 – клещи токовые измерительные модели АТА-2502 (датчик Холла); 16 – трансформатор; 17 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 18 – вольтметр В7-65/2. Установка смонтирована на базе машины АСП-10, предназначенной для электроконтактной сварки стальной проволоки. На корпусе машины устанавливаются модели зубьев пил: нижний 9 и верхний 10. Основным элементом машины является трансформатор 16, концы вторичной обмотки которого присоединены к зубьям 9 и 10. Поскольку зубья соприкасаются в вершинных частях, вторичная цепь трансформатора 16 оказывается замкнутой и по ней потечет ток.

Установка смонтирована на базе машины АСП-10, предназначенной для электроконтактной сварки стальной проволоки. В месте соприкосновения зубьев электрическое сопротивление цепи максимально, и именно в этом происходит местный нагрев.

Регулирование напряжения трансформатора и, как следствие, температуры нагрева достигается изменением напряжения в его первичной обмотке ЛАТРОм 17.

Для определения мощности теплового источника необходимо иметь сведения о величине напряжения и тока, поступающего на зубья 9 и 10. Измерение величины электрического тока осуществляется токовыми измерительными клещами 15 модели АТА-2502 (датчик Холла), в которых наводится ЭДС, пропорциональная величине электрического тока, поступающего на зубья пилы. Далее с токовых клещей ЭДС фиксируется вольтметром 18. Напряжение определяется также вольтметром 18. Мощность теплового источника определялась как произведение электрического тока и напряжения.

Таблица 1

Теплостойкость инструментальных материалов, °С [5]

Стали		Твердые сплавы			Эльбор	Алмаз
углеродистые и легированные	быстрорежущие	вольфрамо-кобальтовые	безвольфрамовые	минералокерамические		
160–400	550–700	800–1000	800–1000	1200	1400	700–800

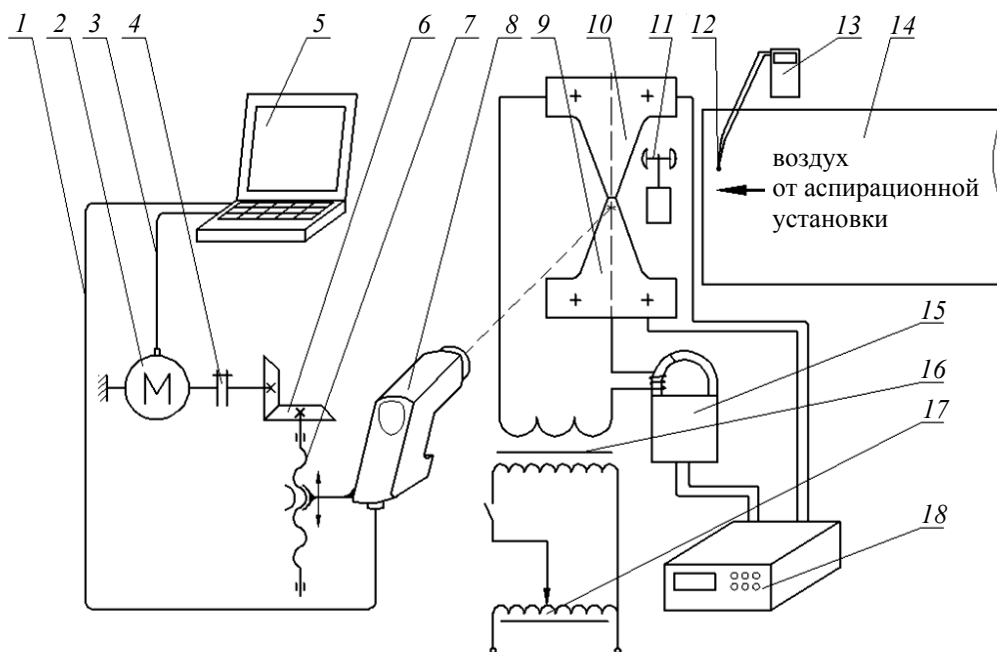


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по определению среднего коэффициента теплопередачи зубьев пил

Измерение температуры по высоте зуба в направлении биссектрисы угла заострения осуществлялось инфракрасным пирометром 8, который устанавливался в начальный момент времени у основания верхнего зуба 10. Расстояние от зуба пилы до пирометра составляет 100 мм, на этом расстоянии диаметр исследуемого участка минимален.

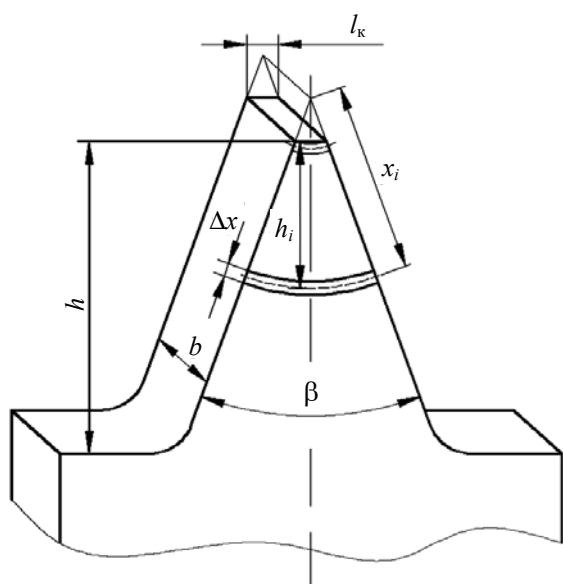


Рис. 2. Схема разбивки зуба на кольцевые участки

Работа на установке выполняется в такой последовательности. При включении пиро-

метра 8 прибор при помощи цифрового соединительного кабеля 1 передает данные о температуре выбранного участка исследуемого объекта на персональный компьютер (ПК) 5. При получении данных от пирометра компьютер 5 посылает сигнал на шаговый электродвигатель 2 по кабелю 3. Шаговый двигатель через жесткую муфту 4, коническую передачу 6 передает движение на винтовую передачу 7. Поскольку пирометр жестко связан с «гайкой» винтовой передачи 7, то прибор перемещается на 1 шаг, и измерение температуры возобновляется.

Измерение температуры по высоте зубьев осуществлялось при перемещении пирометра вертикально вниз от основания верхнего зуба 10 до основания нижнего 9. Температура охлаждающего воздуха регистрировалась при помощи термоэлектрического преобразователя 12 (хромель-алюмелевая термопара), который подключен к измерителю температуры 13 модели Center-308. Скорость воздушного потока контролировалась крыльчатым анемометром 11. Охлаждающий воздух подается на зубья 9 и 10 из патрубка 14 от вентиляционной установки.

Скорость охлаждающего воздуха регулировалась изменением площади сечения входного патрубка дроссельной заслонкой. Все измерения осуществлялись в установившемся тепловом режиме, который определялся окончанием роста температуры в зоне контакта зубьев.

Таблица 2

## Результаты эксперимента по определению среднего коэффициента теплоотдачи зубьев пил

Номер опыта	Натуральные значения факторов			Нормализованные значения факторов			Сила тока $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Температура охлаждающего воздуха $t_{\text{охл}}$ , °С	Значение выходной величины $y = \alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(°С·м <sup>2</sup> ), в дублированном опыте	
	$b \equiv x_1$ , мм	$V \equiv x_2$ , м/с	$Q \equiv x_3$ , Вт	$x_1$	$x_2$	$x_3$				1	2
1	2,2	25	10	-1	-1	-1	74	0,135	29,5	998	994
2	3,6	25	10	+1	-1	-1	75	0,133	28,8	974	1059
3	2,2	50	10	-1	+1	-1	74	0,135	27,3	1278	1246
4	3,6	50	10	+1	+1	-1	75	0,133	27,5	1315	1384
5	2,2	25	15	-1	-1	+1	91	0,165	29,8	960	914
6	3,6	25	15	+1	-1	+1	92	0,163	28,8	958	976
7	2,2	50	15	-1	+1	+1	91	0,165	27,8	1243	1294
8	3,6	50	15	+1	+1	+1	92	0,163	27,7	1341	1354

Передача тепла от зубьев осуществляется через 4 грани: переднюю, заднюю и две боковые. Мощность теплового источника выбиралась таким образом, чтобы температурный напор в основании зуба был равен нулю. Только при этом условии можно полагать, что теплообмен осуществляется через 4 вышеназванные грани зуба, а следовательно, в установившемся тепловом режиме количество выделяющейся теплоты  $Q = IU$  равно количеству теплоты, передающейся в окружающую среду конвективным теплообменом.

Результирующие данные опытов и расчетов по определению средних коэффициентов теплоотдачи зубьев пил  $\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(°С·м<sup>2</sup>) приведены в табл. 2.

Коэффициенты, для которых расчетные значения критерия Стьюдента меньше табличного значения, не являются значимыми. Члены уравнения регрессии с незначимыми коэффициентами должны быть отброшены, и с учетом этого уравнение регрессии будет иметь вид

$$y = 1143 + 27,1x_1 + 164x_2. \quad (6)$$

Проверка адекватности математической модели (уравнения регрессии) осуществляется по методике [5] с помощью F-критерия Фишера при принятом уровне значимости  $q = 0,05$ . Полученное уравнение регрессии адекватно результатам эксперимента и может быть использовано.

После перевода регрессионного уравнения из кодированного вида в натуральный получим уравнение

$$\alpha_{\text{ср}} = 538,7 + 38,7b + 13,1V. \quad (7)$$

Максимально допустимая скорость подачи выбирается как наименьшая из рассчитанных по пяти ограничениям: по заполнению впадин зубьев; шероховатости поверхности распиловки; мощности привода механизма резания; динамической устойчивости пилы; теплостойкости материала зубьев пил.

**Закключение.** 1. Предложена методика расчета скорости подачи по теплостойкости материала зубьев пил. Максимально допустимая скорость подачи выбирается как наименьшая из рассчитанных по пяти ограничениям: заполнению впадин зубьев; шероховатости поверхности распиловки; мощности привода механизма резания; динамической устойчивости пилы; теплостойкости материала зубьев пил.

2. Критерий теплостойкости, при расчете скорости подачи, становится ограничивающим при увеличении высоты пропила и уменьшении числа зубьев.

3. Значения коэффициентов теплоотдачи зубьев пил  $\alpha_{\text{ср}}$  в пределах исследованных факторов колеблются от 914 до 1384 Вт/(°С·м<sup>2</sup>).

4. Наибольшее влияние на величину коэффициентов теплоотдачи зубьев пил оказывает скорость воздушного потока. При увеличении ее значения вдвое (от 25 до 50 м/с)

значения коэффициентов теплоотдачи при постоянных значениях толщины зуба  $b$  и мощности теплового источника  $Q$  возрастают в 1,25–1,40 раза.

5. Мощность теплового источника  $Q$  в пределах изменения фактора (от 10 до 15 Вт) существенного влияния на коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{ср}}$  не оказывает.

### Литература

1. Щепочкин, С. В. Об оценке температуры резания при пилении круглыми пилами / С. В. Щепочкин // *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды Междунар. Евраз. симпоз.* / под ред. И. Т. Глебова. – Екатеринбург, 2006. – С. 143–146.

2. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круг-

лыми пилами / Ю. М. Стахийев, В. К. Пашков. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. – 74 с.

3. Пашков, В. К. О конвективном теплообмене режущей части пилы при резании / В. К. Пашков, С. В. Щепочкин // *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды Междунар. Евраз. симпоз.* / под ред. И. Т. Глебова. – Екатеринбург, 2006. – С. 138–143.

4. Пашков, В. К. Определение температурных перепадов плоских круглых пил / В. К. Пашков, С. В. Щепочкин // *Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. трудов по итогам Междунар. науч.-техн. конф.* – Брянск: БГИТА, 2006. – Вып. 14. – С. 147–152.

5. Моисеев, А. В. Износостойкость дерево-режущего инструмента / А. В. Моисеев. – М.: Лесная пром-сть, 1981. – 112 с.

*Поступила 25.02.2013*