



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.059

А.С. Торопов, Е.Ю. Кузнецов

Поволжский государственный технологический университет

Торопов Александр Степанович родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Марийский политехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры деревообрабатывающих производств Поволжского государственного технологического университета, заслуженный деятель науки республики Марий Эл. Имеет более 200 печатных работ в области интенсификации процессов распиловки лесоматериалов.
E-mail: kuzen@mail.ru



Кузнецов Евгений Юрьевич родился в 1987 г., окончил в 2010 г. Марийский государственный технический университет, аспирант кафедры деревообрабатывающих производств Поволжского государственного технологического университета. Имеет 6 печатных работ в области совершенствования лесопильного оборудования и инструмента.
E-mail: kuzeu@mail.ru



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ КРУГЛЫМИ ПИЛАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ

Приведены результаты теоретических исследований точности пиления древесины круглыми пилами при воздействии суммарной боковой силы и с применением электромагнитных направляющих. Разработана математическая модель взаимодействия параметров электромагнитной направляющей с отклонением пилы.

Ключевые слова: боковая сила, отклонение пилы, точность пиления, электромагнитная направляющая, усилие притяжения.

Исследователями установлено [4], что точность пиления древесины на лесопильных станках зависит от сил, действующих на пилу в процессе пиления, и способности пилы противодействовать этим силам.

Известен аналитический метод оценки точности пиления древесины Г.Ф. Прокофьева [6], который позволяет оценить влияние сил резания на точность пиления древесины на лесопильных станках.

©Торопов А.С., Кузнецов Е.Ю., 2013

Рабочая жесткость пилы от действия сил резания [6]:

$$j_p^P = j_n \left(1 - \frac{P_r}{P_r^{кр}} \right), \quad (1)$$

где j_n – начальная жесткость круглой пилы, Н/м;

P_r – радиальная сила резания, Н;

$P_r^{кр}$ – критическая радиальная сила резания, при достижении которой пила теряет устойчивость, Н.

Рабочая жесткость пилы от температурного перепада [7]:

$$j_p^T = j_n \sqrt{1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{кр}}}, \quad (2)$$

где ΔT – температурный перепад по радиусу диска пилы, °С,

$$\Delta T = T_0 - T_b; \quad (3)$$

T_0 – температура на кромке пилы, °С,

$$T_0 = \frac{18 \cdot 10^4 N_{рез} K_d \alpha_c}{j_3} + T_b; \quad (4)$$

$N_{рез}$ – мощность на резание, кВт;

K_d – коэффициент, учитывающий поступление тепла в диск;

$$\alpha_c = \frac{I_0(\sqrt{Bi})}{2\pi h \lambda_c \sqrt{Bi} I_1(\sqrt{Bi})} [7];$$

j_3 – механический эквивалент теплоты, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{ккал}}$;

T_b – температура окружающего воздуха, °С;

$\Delta T_{кр}$ – критический температурный перепад, °С,

$$\Delta T_{кр} = \frac{1}{\alpha_l} \left[\frac{\left(\frac{h}{a}\right)^2}{12(1-\mu^2)} f_0'(c, \lambda) + \frac{\rho v^2}{E} f_0''(c, \lambda) \right]; \quad (5)$$

α_l – коэффициент теплового расширения стали, $1/^\circ\text{C}$;

h – толщина диска, м;

a – внешний радиус диска, м;

μ – коэффициент Пуассона;

$f_0'(c, \lambda), f_0''(c, \lambda)$ – безразмерные функции [7];

ρ – плотность диска, $\text{кг}/\text{м}^3$;

v – скорость вращения диска, м/с;

E – модуль Юнга, Па.

Начальная жесткость круглой пилы [7] определяется из уравнения

$$J_n = \frac{\pi E h^3}{6(1-\mu^2)a^2 f(c)}, \quad (6)$$

где $f(c)$ – безразмерная функция.

Критическое значение радиальной силы резания для невращающегося диска без начальных напряжений [7] определяется по формуле

$$P_r^{кр} = \frac{\pi E h^3}{12(1-\mu^2)} \frac{f(c, \lambda, P_t / P_r)}{(D - d_\phi)}, \quad (7)$$

где $f(c, \lambda, P_t / P_r)$ – безразмерная функция, во всех случаях можно принять

$$f(c, \lambda, P_t / P_r) = 1,167 [7];$$

P_t / P_r – отношение касательной и радиальной сил резания, Н;

D – диаметр пилы, м;

d_ϕ – диаметр зажимных фланцев, м.

Условие точного пиления на лесопильных станках [6] имеет вид:

$$y_{\max} = \frac{Q}{j_p^P} \leq [y], \quad (8)$$

где y_{\max} – максимальное отклонение пилы под действием боковой силы резания, м;

Q – боковая сила резания, Н;

j_p^P – рабочая жесткость пилы от действия сил резания, Н/м;

$[y]$ – допустимое отклонение пилы при пилении, м.

Ю.М. Стахийев [7], G.S. Shajer [11], C.D. Mote [10], S.G. Hutton [8] установили, что значительное влияние на точность пиления древесины круглыми пилами оказывают напряжения от температурного перепада, центробежных сил инерции. Исследования точности пиления древесины круглыми пилами, выполненные Л.А. Ковалевым [4], показали, что условие точного пиления круглыми пилами может быть представлено выражением (8). Однако полученные результаты оказались заниженными по сравнению с экспериментальными из-за отсутствия надежного аналитического метода расчета боковых сил. Но при оценке точности пиления круглыми пилами недостаточно учитывать влияние только боковых сил резания.

Для повышения точности пиления наиболее эффективно использовать направляющие [7]. Нами разработана конструкция электромагнитной направляющей, где снижение отклонения пилы достигается за счет электромагнитного поля, возникающего в воздушном зазоре между пилой и электромагнитами [5].

Цель данной работы – исследование точности пиления древесины круглыми пилами с электромагнитными направляющими.

Решаемые задачи:

разработать математическую модель взаимодействия параметров электромагнитной направляющей с отклонением пилы;

получить формулу для определения точности пиления древесины круглыми пилами при действии суммарной боковой силы и с применением электромагнитных направляющих.

В работе [9] представлена математическая модель определения суммарной боковой силы, которая основана на работе [8]. Система сил, приложенных к диску, показана на рис. 1, а.

На основании классической теории тонких пластин с малыми перемещениями получено уравнение колебаний диска:

$$D\nabla^4 W - h \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\sigma_r^r \frac{\partial W}{\partial r} + \tau_{r\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) \right] - \frac{h}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\tau_{r\varphi} \frac{\partial W}{\partial r} + \sigma_{\varphi\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \varphi} \right) + hp \left(\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + 2\Omega \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi \partial t} + \Omega^2 \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right) - q(r, \varphi) + P_{\text{ск}} = 0, \quad (9)$$

где D – цилиндрическая жесткость, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$;

∇^4 – оператор Лапласа, $\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right)^2$;

$P_{\text{ск}}$ – боковые силы.

Боковые силы $P_{\text{ск}}$ (рис. 1, а) образуются под действием напряжений от температурного перепада, центробежных сил инерции, радиальной и касательной сил резания, демпфирующих сил:

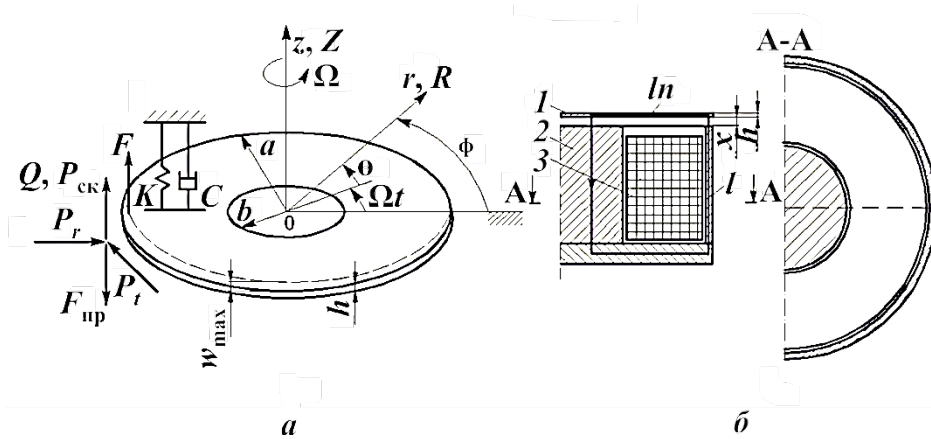


Рис. 1. Система сил, приложенных к диску (а), и конструкция электромагнита (б): 1 – полотно пилы, 2 – сердечник электромагнита, 3 – обмотка; P_r, P_t, Q – радиальная, касательная, боковая силы резания; a, b – внешний радиус диска и фланцев; h – толщина диска; r, θ, z – система координат, связанная с телом; R, φ, Z – пространственная система координат; $\varphi = \theta + \Omega t$; t – время; F – суммарная боковая сила; $F_{\text{пр}}$ – усилие притяжения; w_{max} – максимальное отклонение пилы

$$P_{\text{ск}} = \left(KW + C \frac{\partial W}{\partial t} \right), \quad (10)$$

где K – коэффициент сопротивления раскалыванию древесины;
 $\frac{\partial W}{\partial t}$ – изменение отклонения пилы под действием напряжений от темпера-

турного перепада, центробежных сил, радиальной и касательной сил резания во времени;

C – коэффициент демпфирования воздуха.

Демпфирующие силы образуются в результате взаимодействия резца с древесиной и воздухом, они характеризуются сопротивлением раскалыванию древесины и коэффициентом демпфирования воздуха.

Суммарная боковая сила образуется от действия боковой силы резания Q и боковых сил $P_{\text{ск}}$:

$$F = Q + P_{\text{ск}}. \quad (11)$$

Радиальные, тангентальные и касательные центробежные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^r &= D_1 + D_2 \frac{1}{r^2} + D_3 r^2; \\ \sigma_{\varphi\varphi}^r &= D_1 - D_2 \frac{1}{r^2} + D_4 r^2; \\ \tau_{r\varphi}^r &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где $D_1 - D_4$ – коэффициенты центробежных напряжений [9].

Напряжения от сил резания:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^c &= \frac{a_0}{r^2} + \left(\frac{a_1}{r} + 2b_1 r - \frac{2a_1'}{r^3} + \frac{b_1'}{r} \right) \cos \varphi + \left(\frac{c_1}{r} + 2d_1 r - \frac{2c_1'}{r^3} + \frac{d_1'}{r} \right) \sin \varphi; \\ \sigma_{\varphi\varphi}^c &= -\frac{a_0}{r^2} + \left(6b_1 r + \frac{2a_1'}{r^3} + \frac{b_1'}{r} \right) \cos \varphi + \left(6d_1 r + \frac{2c_1'}{r^3} + \frac{d_1'}{r} \right) \sin \varphi; \\ \tau_{r\varphi}^c &= \frac{c_0}{r^2} + \left(2b_1 r - \frac{2a_1'}{r^3} + \frac{b_1'}{r} \right) \sin \varphi - \left(2d_1 r - \frac{2c_1'}{r^3} + \frac{d_1'}{r} \right) \cos \varphi, \end{aligned} \quad (13)$$

где $a_0 - d_1'$ – коэффициенты напряжений от сил резания [9].

Температурные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^T &= \frac{E\alpha_l}{r^2} \left(\frac{r^2 - b^2}{a^2 - b^2} \int_b^a T r dr - \int_b^r T r dr \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi}^T &= \frac{E\alpha_l}{r^2} \left(\frac{r^2 + b^2}{a^2 - b^2} \int_b^a T r dr - \int_b^r T r dr - Tr^2 \right); \\ \tau_{r\varphi}^T &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где T – температура на поверхности диска, $T = T_0 \left(\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \right)$.

Общие радиальные σ_{rr} , тангентальные $\sigma_{\phi\phi}$, касательные $\tau_{r\phi}$ напряжения равны сумме напряжений от центробежных сил инерции (12), сил резания (13) и температурного перепада (14):

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \sigma_{rr}^r + \sigma_{rr}^c + \sigma_{rr}^T; \\ \sigma_{\phi\phi} &= \sigma_{\phi\phi}^r + \sigma_{\phi\phi}^c + \sigma_{\phi\phi}^T; \\ \tau_{r\phi} &= \tau_{r\phi}^c. \end{aligned} \quad (15)$$

Задача об изгибе сводится к решению дифференциального уравнения (9) с граничными условиями путем его интегрирования по методу Галеркина.

Граничные условия: $W|_{(b,\phi,t)} = 0; \frac{\partial W}{\partial r}|_{(b,\phi,t)} = 0$.

Отклонение пилы под действием напряжений:

$$W = [C_{mn} \cos(n\phi) + S_{mn} \sin(n\phi)] R_{mn}(r); \quad m, n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (16)$$

где C_{mn}, S_{mn} – функции времени диска:

$$\eta_{mn}^{(1)} C_{mn} + \eta_{mn}^{(2)} S_{mn} = Q R_{mn}(r_Q) \cos(n\phi_Q); \quad (17)$$

$$\eta_{mn}^{(3)} C_{mn} + \eta_{mn}^{(4)} S_{mn} = 0;$$

$\eta_{mn}^{(1)}, \eta_{mn}^{(2)}, \eta_{mn}^{(3)}, \eta_{mn}^{(4)}$ – коэффициенты, определяемые из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \eta_{mn}^{(1)} &= \alpha \zeta_{mn}^1 + K R_{mn}^2(r_K) \cos^2(n\phi_K); \\ \eta_{mn}^{(2)} &= -\alpha \zeta_{mn}^2 + K R_{mn}^2(r_K) \sin(n\phi_K) \cos(n\phi_K); \\ \eta_{mn}^{(3)} &= \beta \zeta_{mn}^2 + K R_{mn}^2(r_K) \sin(n\phi_K) \cos(n\phi_K); \\ \eta_{mn}^{(4)} &= \alpha \zeta_{mn}^1 + K R_{mn}^2(r_K) \sin^2(n\phi_K); \end{aligned} \quad (18)$$

α, β – коэффициенты, определяемые из условий

$$\alpha = \begin{cases} 2 & (n = 0) \\ 1 & (n \neq 0) \end{cases}; \quad \beta = \begin{cases} 0 & (n = 0) \\ 1 & (n \neq 0) \end{cases};$$

$\zeta_{mn}^1, \zeta_{mn}^2$ – коэффициенты, определяемые из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \zeta_{mn}^1 &= \int_b^a \pi R_{mn} [D r \left(\frac{d^4}{dr^4} + \frac{2}{r} \frac{d^3}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{d}{dr} - \frac{2n^2}{r^2} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2n^2}{r^3} \frac{d}{dr} - \frac{4n^2}{r^4} + \frac{n^4}{r^4} \right) R_{mn} - \\ &- h \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_{rr} \frac{dR_{mn}}{dr}) - h \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi} \frac{dR_{mn}}{dr} + \frac{1}{r} h n^2 R_{mn} \sigma_{\phi\phi} - n^2 \Omega^2 h \rho r R_{mn}] dr; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\zeta_{mn}^2 = h\pi n \int_b^a \pi R_{mn} \left(R_{mn} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + 2\tau_{r\varphi} \frac{dR_{mn}}{dr} + \frac{1}{r} R_{mn} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} \right); \quad (20)$$

m, n – число узловых окружностей и диаметров диска;
 $R_{mn}(r)$ – радиальная собственная функция диска,

$$R_{mn}(r) = \sum_{l=0}^4 E_{mn}^l r^{l+m}; \quad (21)$$

E_{mn}^l – коэффициенты радиальной собственной функции диска [9];

l – порядковый номер коэффициента радиальной собственной функции диска.

Расчет касательной (P_t), радиальной (P_r), боковой (Q) сил резания и мощности резания ($N_{рез}$) производили по формулам, представленным в работах Ю.М. Стахиева [7] и А.Л. Бершадского [1].

Касательная сила резания [7]:

$$P_t = a_p p b_1 + u_z \sin \theta_1 (k_1 b_2 + 2a_r H_1), \quad (22)$$

где a_p – коэффициент затупления;

p – фиктивная удельная касательная сила по задней грани, Н/м;

b_1 – ширина стружки, м;

u_z – подача на зуб, м;

θ_1 – кинематический угол встречи, рад;

k_1 – фиктивное касательное давление на стружку со стороны передней грани, Н/м²;

b_2 – ширина пропила, м;

a_r – коэффициент эффективного трения стружки о стенки пропила и пресования ее во впадине зуба;

H_1 – текущая глубина реза, м.

Радиальная сила резания [1]:

$$P_r = \frac{P_3}{f} - P_n \operatorname{tg}(70 - \delta_1), \quad (23)$$

где P_3 – окружное усилие по задней грани, Н;

f – коэффициент трения;

P_n – окружное усилие по передней грани, Н;

δ_1 – угол резания, рад.

В.И. Санев отмечает, что средние значения боковой силы резания составляют 8 % от касательной силы резания $Q \approx 0,08 P_t$ [4].

Мощность резания

$$N_{рез} = \frac{K_p b h U}{6000}, \quad (24)$$

где K_p – удельная работа резания, Дж/м³;

U – напряжение питания электромагнита, В.

Исполнительным механизмом в конструкции электромагнитной направляющей является электромагнит, выставленный с зазором x относительно полотна пилы. Конструкция электромагнита представлена на рис. 1, б.

Известны формулы для расчета усилия притяжения якоря [3]. Однако они не учитывают зависимость усилия притяжения от магнитных свойств, толщины и отклонения пилы, боковых сил.

Поэтому нами разработана математическая модель взаимодействия параметров электромагнита с отклонением пилы.

1. Индукция электромагнитного поля

$$B = \frac{IN}{\left(\frac{2h + l_n}{\mu_n} + \frac{l}{\mu_m} + \frac{2x}{\mu_0} \right)}, \quad (25)$$

где I – сила тока, А;

l, l_n – длина магнитопровода и полотна пилы, находящегося в электромагнитном поле, м (рис. 3, б);

μ_m, μ_0, μ_n – магнитная проницаемость магнитопровода, воздуха, пилы, Гн/м;
 x – воздушный зазор, м.

2. Воздушный зазор

$$x = [n](w_{\max} + B' + A_T), \quad (26)$$

где $[n]$ – коэффициент запаса по точности;

w_{\max} – максимальное отклонение пилы, м;

B', A_T – развод зубьев и торцевое биение пилы, м.

3. Усилии притяжения

$$F_{\text{пр}} = \frac{B^2 S}{2\mu_0 n_p}, \quad (27)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²;

n_p – число полюсов электромагнита.

Усилии притяжения пилы компенсирует боковые силы, следовательно, оно должно быть равно боковым силам по величине и противоположно по направлению. Компенсация боковой силы резания Q приведет к остановке процесса пиления, проблема становится неразрешимой. Поэтому в уравнении (11) будут компенсироваться боковые силы $P_{\text{ск}}$ (10).

Таким образом, в случае применения электромагнитных направляющих, при условии $F_{\text{пр}} = P_{\text{ск}}$, суммарная боковая сила

$$F_{\text{эм}} = Q + P_{\text{ск}} - F_{\text{пр}}. \quad (28)$$

Максимальное отклонение пилы от суммарной боковой силы F определяется по формуле

$$w_{\max} = \frac{Q}{j_p^P} + \frac{P_{\text{ск}}}{j_p^T}, \quad (29)$$

где j_p^T – рабочая жесткость от температурного перепада, Н/м.

При этом должно соблюдаться условие точного пиления $w_{\max} \leq [y]$.

В формуле (29) при воздействии на пилу боковых сил $P_{\text{ск}}$ учитывается рабочая жесткость от температурного перепада j_p^T (2), так как температурные напряжения оказывают наибольшее влияние на отклонение круглой пилы [7].

Из уравнения (25) получим выражение для определения силы тока в зависимости от отклонения пилы под действием боковых сил $P_{\text{ск}}$:

$$I = B_{\text{ск}} \frac{\left(\frac{2s + l_{\text{п}}}{\mu_n} + \frac{l}{\mu_m} + \frac{2x}{\mu_0} \right)}{N}, \quad (30)$$

где $B_{\text{ск}}$ – электромагнитная индукция в зависимости от боковых сил $P_{\text{ск}}$ при $F_{\text{пр}} = P_{\text{ск}}$,

$$B_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ск}} 2\mu_0 n_{\text{п}}}{S}}. \quad (31)$$

В случае применения электромагнитных направляющих предлагается максимальное отклонение пилы определять по следующей формуле:

$$w_{\max}^{\text{эм}} = \frac{Q}{j_p^P} + \frac{P_{\text{ск}} - \frac{B_{\text{ск}}^2 S}{2\mu_0 n_{\text{п}}}}{j_p^T}. \quad (32)$$

При решении уравнений использовали программу MathCAD14.

Исходные данные: $a = 0,28$ м; $b = 0,035$ м; $h = 0,022$ м; $z = 48$ шт.; $\theta = 0,419$ рад; $E = 2,24 \cdot 10^{11}$ Па; $\rho = 7850$ кг/м³; $\alpha_1 = 0,000011$ °С⁻¹; $\Omega = 145$ рад/с; $\mu = 0,3$; $m = 0$, $n = 1$; $\phi = 130$ рад; $\phi, \phi_0, \phi_K = 0,414$ рад; $r, r_0, r_K = 0,28$ м; $\alpha, \beta = 1$; $b_2 = 0,005$ м; $b_1 = 0,0022$ м; $a_p = 1$; $a_T = 0,072$; $f = 0,7$; $\theta_1 = 1,157$ рад; $\delta_1 = 1,05$ рад; $B' = 0,0014$ м; $A_T = 0,0005$ м; $f(c) = 2,9$; $n_{\text{п}} = 3$; $T_b = 20$ °С; $K_d = 0,01$; $j_3 = 4270$ Н·м/ккал; $l = 0,275$ м; $l_{\text{п}} = 0,085$ м; $S = 0,006$ м²; $t = 0,29$ с; $\mu_m = 0,001256$ Гн/м; $\mu_{\text{п}} = 0,0007536$ Гн/м; $\mu_0 = 0,0000004\pi$ Гн/м; $j_H = 6000$ Н/м; $P_r^{\text{сп}} = 1634$ Н; $[n] = 1,2$; $v = 40$ м/с; $C = 0$; $K = -7200$ Н/м (для сосны, резание в тангентальной плоскости) [2].

В таблице представлены данные об отклонении пилы от суммарной боковой силы (29) и с применением электромагнитных направляющих (32). При использовании электромагнитных направляющих суммарная боковая сила равна боковой силе резания: $F_{\text{эм}} = Q$. Отклонение пилы при использовании электромагнитных направляющих равно по отклонению от боковой силы резания: $w_{\max}^{\text{эм}} = y_{\max}$. На основании данных таблицы построены графики максимального отклонения пилы от скорости подачи u и высоты пропила h (рис. 2).

Графики показывают, что применение электромагнитных направляющих может повысить точность пиления в 2–3 раза при увеличении высоты пропила (рис. 2, а) и в 1,7–1,9 раза при увеличении скорости подачи (рис. 2, б). Отклонение пилы от боковой силы резания y_{\max} в несколько раз меньше отклонения от суммарной боковой силы w_{\max} .

Результаты исследований точности пиления древесины круглой пилой

Показатель качества пиления	Значение показателя						
	при $u = 10$ м/мин и h , мм			при $h = 50$ мм и u , м/мин			
	50	75	100	1	4	7	10
w_{\max} , мм	0,88	1,62	1,85	0,43	0,54	0,72	0,88
$w_{\max}^{\text{ЭМ}}$, мм	0,46	0,55	0,62	0,25	0,31	0,40	0,46
F , Н	5,20	9,40	10,50	2,40	3,25	4,30	5,20
$F_{\text{ЭМ}}$, Н	2,80	3,30	3,90	1,50	1,90	2,40	2,80
$N_{\text{рез}}$, кВт	2,23	3,77	5,59	1,37	1,66	1,95	2,23

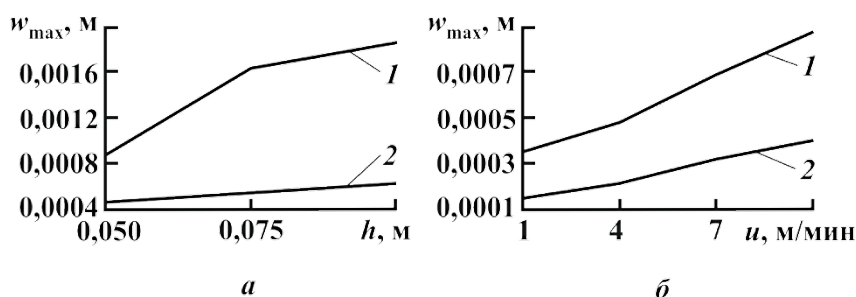


Рис. 2. Зависимость максимального отклонения пилы от скорости подачи (а) и высоты пропила (б): 1 – отклонение пилы w_{\max} от суммарной боковой силы; 2 – отклонение пилы $w_{\max}^{\text{ЭМ}}$ с применением электромагнитных направляющих

Графики зависимости силы тока (определяемого по уравнению (30)) от максимального отклонения пилы при увеличении высоты пропила (рис. 3, а) и скорости подачи (рис. 3, б) показывают, какую величину силы тока необходимо создать в обмотке электромагнита, чтобы компенсировать отклонение пилы w_{\max} .

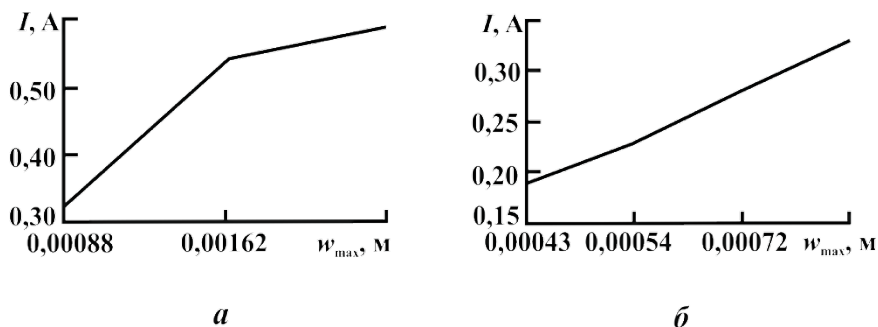


Рис. 3. Зависимость силы тока I в обмотке электромагнита от максимального отклонения пилы w_{\max} при увеличении высоты пропила (а) и скорости подачи (б)

Таким образом, получены формулы для определения точности пиления древесины круглыми пилами с электромагнитными направляющими и при воздействии суммарной боковой силы. Они позволяют определять параметры

электромагнитных направляющих в процессе их проектирования и применения в промышленности. Результаты исследований нуждаются в проверке, поэтому в дальнейшем будут проведены экспериментальные исследования точности пиления с электромагнитными направляющими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бершадский А.Л.* Расчет режимов резания древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 173 с.
2. *Боровиков А.М., Уголев Б.Н.* Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.
3. *Касаткин А.С., Немцов М.В.* Курс электротехники: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2005. 542 с.
4. *Ковалев Л. А.* Повышение точности пиления древесины круглыми пилами: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Архангельск, 2011. 19 с.
5. Пат. № 2397861 РФ, МПК В 27 В 13/10. Отжимная магнитная направляющая круглой пилы / Шарапов Е.С., Кузнецов Е.Ю. 2009136759/03; заявл. 05.10.2009 ; опубл. 27.08.2010.
6. *Прокофьев Г.Ф.* Аналитический метод определения точности пиления древесины рамными и ленточными пилами // Лесн. журн. 1996. № 6. С. 74–80. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Стахийев Ю.М.* Устойчивость и колебания плоских круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 267 с.
8. *Hutton S. G., Chonan S., Lehman B.F.* Dynamic response of a guided circular saw // Journal of Sound and Vibration. 1987. Vol. 112, N 3. P. 527–539.
9. *Longxiang Y.* Supercritical speed response of circular saws: a thesis for the degree master of applied science. Canada: Vancouver, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, 1990.
10. *Mote C.D., Szumany R.* Principal developments in circular saw vibration and research // Journal Holz als Roh und Werkstoff. N 35. 1977. P. 219–225.
11. *Schajer G.S.* Why are guided circular saws more stable than unguided saws? // Journal Holz als Roh und Werkstoff. 1986. N 44. P. 465–469.

Поступила 26.04.12

A.S. Toropov, E.Yu. Kuznetsov
Volga State University of Technology

Theoretical Research of Accuracy of Woodsawing by Circular Saws using Electromagnetic Guides

The article presents the results of theoretical researches of accuracy of woodsawing by circular saws when exposed to total side force and using electromagnetic guides. A mathematical model of interaction of electromagnetic guide parameters with the saw displacement value was developed.

Key words: side force, saw displacement, sawing accuracy, electromagnetic guide, lifting force.