

хрупкость при встрече с металлическими и другими твердыми включениями, высокие напряжения и, как следствие, низкая прочность паяного шва из-за разности температурных коэффициентов удлинения стального корпуса и пластинок твердого сплава [2]. Такие пилы быстро затупляются при обработке влажной древесины.

Преимущество стеллитированных режущих инструментов наиболее ярко проявляется при распиловке твердых пород древесины (красное дерево, тик, дуб и др.), влажной и мерзлой древесины. Преимущества наблюдаются при пилении и мягких пород древесины, сухой древесины: боковые вершинки режущей кромки зуба пилы, образованные пересечением передней, задней и боковыми гранями, длительно сохраняют свою остроту, в результате чего улучшается шероховатость распиленных поверхностей.

У твердосплавных пил замедляется процесс затупления режущих кромок зубьев и в процессе пиления сокращается расход мощности.

**Вывод.** Используя выше рассмотренные приемы, можно подобрать рациональные режимы и снизить затраты электрической энергии на пиление древесины.

### Библиографический список

1. Глебов, И.Т. Расчет режима резания древесины пилами с глубокими пазухами [Текст]/ И.Т. Глебов//Современные проблемы лесозаготовительных производств, производства материалов и изделий из древесины: пиломатериалы, фанера, деревянные дома заводского изготовления, столярно-строительные изделия. Материалы Международной научно-практической конференции 27-28 марта 2009 г. Т. 1.С-Петербург, 2009. С.74-81.

2. Зайцев, В.В. Особенности конструкций пыльного инструмента в условиях закрытого резания при первичной переработке круглого леса большого диаметра и повышение ресурса пил с использованием перспективной технологии наплавки стеллита [Текст]/ В.В. Зайцев/М.: "Лесопромышленник" №2. №3. 2001.

**Глебов И.Т.** (УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) [GIT5@yandex.ru](mailto:GIT5@yandex.ru)

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

### MODERN METHODS OF CALCULATION OF MODES OF WOOD CUTTING

Теорией резания древесины разработано несколько расчетных методов, позволяющих определять мощность и силы резания, скорости подачи. Основные методы следующие:

- метод, использующий уравнения регрессии;
- метод, использующий эмпирические степенные формулы;
- метод использования объемной формулы;
- метод использования табличной силы;
- метод А.Л. Бершадского;
- аналитический.

Рассмотрим эти расчетные методы подробнее, попытаемся установить их достоинства и недостатки, дадим рекомендации по их использованию.

**Метод, использующий уравнения регрессии.** Одним из результатов научно-исследовательских работ служат уравнения регрессии, которые отражают влияние переменных факторов режима резания на мощность или силу резания. Так, например, в исследовательской работе Гриневича С.А. по фрезерованию кромок фанеры приведено уравнение регрессии для мощности резания, Вт [1]:

$$P = 2230,47 - 9951,78a - 35,37V - 147,04t - 24,06\delta + 72,09aV + 4,88Vt + 90,60a\delta + 326,22at + 0,43V\delta + 5875,56a^2, \quad (1)$$

где  $a$  – толщина срезаемого слоя (0,15...0,45 мм);  $V$  – скорость главного движения (20...50 м/с);  $t$  – глубина фрезерования (1,5...4,5 мм);  $\delta$  – угол резания (50...70 град.).

**Пример 1.** Определить мощность на фрезе при следующем режиме резания:  $a = 0,15$  мм;  $V = 35$  м/с;  $t = 3$  мм;  $\delta = 65^\circ$ . По формуле (1) получим  $P = 526,2$  Вт.

Адекватность уравнений корреляции может быть математически рассчитана. Точность уравнений может быть достаточно большой, а расчет нетрудоемким. Однако параметры режима резания должны находиться в узком диапазоне и не выходить за пределы, для которых уравнение написано. Если, например, изменить диаметр фрезы, то изменится длина дуги контакта лезвий с заготовкой, изменится сила резания, а предложенное уравнение корреляции это изменение не учитывает. Результаты расчета будут отличаться от фактических. И так во всем. Итак, уравнения корреляции можно использовать при выполнении расчетов в случае, если параметры режима резания не выходят за пределы, учтенные уравнением.

**Расчетный метод, использующий эмпирические степенные формулы.** Эмпирические формулы не вытекают органически из закономерностей процесса резания древесины. Они составляются при математической обработке результатов экспериментов, которые при различных способах обработки могут быть трансформированы в различные формулы. Наиболее часто составляются формулы степенного типа. Они широко рекомендуются кафедрой станков и инструментов Санкт-Петербургской лесотехнической академии [2, 3].

Практически для каждого вида обработки древесины (пиление рамными, ленточными и круглыми пилами, фрезерование и др.) предложены степенные формулы. Например, при пилении древесины на лесопильной раме средняя сила резания в расчете на одну пилу с разведенными зубьями может быть найдена по формуле, Н:

$$F_x = 0,43zS_z^{0,54}t^{0,95}\delta^{0,80}b^{0,52}\gamma_0^{1,45}\rho^{0,28}\psi^{-0,1}, \quad (2)$$

где  $z$  – число зубьев, находящихся в пропиле;  $S_z$  – подача на зуб, мм;  $t$  – высота пропила, см;  $\delta$  – угол резания зубьев, град.;  $b$  – ширина пропила, мм;  $\gamma_0$  – плотность древесины, г/см<sup>3</sup>;  $\rho$  – радиус закругления режущих кромок зубьев, мкм;  $\psi$  – угол встречи с годовыми кольцами (характеризует положение пилы относительно центра постава), град.

Применение этой формулы возможно только для условий, для которых она составлена: влажность древесины  $w = 60...80\%$ ; подача на зуб  $S_z = 0,2...1,8$  мм; высота пропила  $t = 16...40$  см; угол резания  $\delta = 60...80^\circ$ ; радиус закругления режущей кромки  $\rho$

= 18...80 мкм; ширина пропила  $b=2,2...3,0$  мм; плотность древесины  $\gamma_0 = 0,4...0,9$  г/см<sup>3</sup>; угол встречи с годовыми кольцами  $\psi=20...90^\circ$ .

**Пример 2.** Определить значение касательной силы резания на одной рамной пиле при следующем режиме пиления: при шаге зубьев пилы  $t_3 = 32$  мм и высоте пропила  $t = 16,0$  см число зубьев, находящихся в пропиле  $z = 5$ ; при ходе пильной рамки  $H = 700$  мм и посылке  $S_{2x} = 30,6$  мм подача на зуб  $S_z = 1,4$  мм;  $b = 3,0$  мм,  $\rho = 20$  мкм,  $\delta = 75^\circ$ ,  $\gamma_0 = 0,5$  г/см<sup>3</sup>;  $\psi = 90^\circ$ ; влажность  $w = 60\%$ , зубья разведены. По формуле (2) получим  $F_x = 1085,9$  Н.

Формула охватывает достаточно широкий диапазон параметров режимов резания, расчеты по ней нетрудоемки. Однако по степенной формуле невозможно решение обратной задачи, невозможен поиск рационального режима резания, удовлетворяющего критериям по шероховатости, производительности, энергоемкости, себестоимости и др.

Этот метод расчета удобен на стадии проектных работ, при выборе рационального варианта из множества вариантов.

**Метод использования объемной формулы.** В основу метода положено определение понятия удельной работы резания, как работы, необходимой для превращения в стружку древесины объемом 1 см<sup>3</sup>. Если значение удельной работы резания  $K$  помножить на секундный объем древесины, превращаемой в стружку  $W_c$ , то получится мощность, затрачиваемая на резание:

$$P = \frac{KW_c}{1000} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{см}^3} \cdot 1 \frac{\text{см}^3}{\text{с}} / 1000 = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} / 1000 = \frac{1\text{Вт}}{1000} = 0,001 \text{ кВт}.$$

Для станков с непрерывной подачей заготовок (продольно-фрезерных, круглопильных, ленточнопильных, лесопильных рам и др.) мощность на резание можно найти по объемной формуле, кВт

$$P = \frac{KW_c}{1000} = \frac{KbtV_s}{60 \cdot 1000}, \quad (3)$$

где  $K$  – удельная работа резания, Дж/см<sup>3</sup>, количественно равная удельной силе резания  $F_{y0}$ , Мпа;  $b$  – ширина фрезерования или ширина пропила, мм;  $t$  – глубина фрезерования или высота пропила, мм;  $V_s$  – скорость подачи, м/мин.

Расчетный метод применяется с 40-х годов прошлого столетия [4, 5] и применяется часто. Он позволяет решать прямые и обратные задачи, не слишком трудоемок.

Уязвимость расчетного метода заключается в определении значения удельной работы резания  $K$ , входящей в формулу (3). Для этого пользуются экспериментальными данными для заданного вида обработки древесины, представленными в таблицах или номограммах. Найденное таким образом значение  $K$  называют условно табличным и обозначают  $K_m$ . Табличное значение  $K_m$  получено для конкретных условий резания, и чтобы распространить его на другие условия используют поправочные коэффициенты на влажность, на породу, скорость главного движения, затупление лезвий и т.д. Значения поправочных коэффициентов берут из справочных таблиц. С учетом сказанного объемная формула получает вид

$$P = a_n a_w a_v a_\delta a_\rho \frac{K_m b t V_s}{60 \cdot 1000} \quad (4)$$

**Пример 3.** Определить значение касательной силы резания на одной рамной пиле при режиме пиления по примеру 2.

*Решение.* Для решения задачи необходимы дополнительные данные: частота вращения коленчатого вала  $n = 360 \text{ мин}^{-1}$ , скорость главного движения  $V = 8,4 \text{ м/с}$ . Скорость подачи  $V_s = 11,0 \text{ м/мин}$ , порода древесины ель влажностью  $w = 60\%$  плотностью  $0,5 \text{ г/см}^3$ . Поправочные коэффициенты  $a_n = 0,95$ ,  $a_\rho = 1,4$ ; Табличное значение по (6, с.99)  $K_m = 54,5 \text{ Дж/см}^3$ .

Для рамного пиления формулу (4) запишем так:

$$P = a_n a_\rho \frac{K_m b t V_s}{60 \cdot 1000} = 0,95 \cdot 1,4 \frac{54,5 \cdot 3 \cdot 160 \cdot 11}{60 \cdot 1000} = 6,38 \text{ кВт.}$$

Окружная касательная сила резания на пиле

$$F_x = 1000P/V = 1000 \cdot 6,38 / 8,4 = 759,4 \text{ Н, (в примере 2 } F_x = 1085,9 \text{ Н).}$$

Таким образом, введение дополнительной информации, которая потребовалась для решения задачи, привело к новому результату.

Расчетный метод по объемной формуле не обладает гибкостью, не позволяет почувствовать физическую сущность процесса резания, не отражает взаимосвязь и взаимозависимость факторов процесса резания. Расчетный метод малоприспособлен для анализа процесса резания как технологической системы. Поправочные коэффициенты представляют собой фиксированный набор значений, не отражающий взаимозависимость и не учитывающий в полной мере параметры процесса резания. Так, например, коэффициент затупления  $a_\rho$  для стального лезвия принимается по таблице [6] в зависимости от продолжительности работы лезвия и угла встречи. Если материал лезвия, порода обрабатываемой древесины или влажность древесины изменились, то нужны новые справочные таблицы для определения коэффициента затупления. Для пользования методом надо иметь большой набор справочных таблиц, что делает его громоздким.

Табличное значение  $K_m$  принимается по экспериментальным данным, приведенным Ф.М. Манжосом для расчета процесса пиления рамными пилами [6, с. 99], круглыми пилами [6, с. 127], цилиндрического фрезерования [6, с. 236].

**Метод использования табличной силы.** Метод основан на использовании табличной силы  $F_{xm}$ , которую принимают для различных видов обработки древесины по таблицам. Отклонение заданного режима резания от табличного учитывают поправочными коэффициентами. Тогда расчетная касательная сила резания находится по формуле

$$F_x = a_n a_w a_v a_\delta a_\rho F_{xm}. \quad (5)$$

Метод табличной силы мало чем отличается от метода использования объемной формулы и обладает теми же достоинствами и недостатками. В обоих методах используются одни и те же справочные таблицы, одни и те же поправочные коэффициенты. При решении прямых и обратных задач эти методы объединяют.

**Метод А.Л. Бершадского.** Метод создан в 60-х годах прошлого столетия на базе общего закона резания древесины. В последние годы он несколько модернизирован, в нем используются поправочные коэффициенты, экспериментальные данные, аналитические зависимости, метод стал универсальным, пригодным для решения прямых и обратных задач, а также для системного анализа процесса резания. По сравнению с дру-

гими методами расчетный метод А.Л. Бершадского более трудоемкий, но пригодный для решения любых задач. Современный метод А.Л. Бершадского характеризуется следующими особенностями.

1. В результате обработки экспериментальных значений удельной работы резания, полученных в исследовательских работах Ф.М. Манжоса, М.М. Козела, И.С. Кугеля (фрезерование, 1956-1960 гг.) и А.А. Смирнова (пиление, 1958 г.) были получены уравнения для расчета значений фиктивной силы резания  $p$ , Н/мм, и касательного давления на переднюю поверхность лезвия  $k$ , МПа. Так, например, при фрезеровании древесины сосны при толщине срезаемого слоя  $a \geq 0,1$  мм:

$$p_{//-\perp} = 1,57 + 3,23 \sin^{1,25} \varphi_{\theta};$$

$$k_{//-\perp} = 0,196\delta + 0,069V' - 5,4 + (0,354\delta + 0,127V' - 14,22) \sin^{1,25} \varphi_{\theta}. \quad (6)$$

Здесь  $\delta$  подставляют в град.,  $V'$  – в м/с. Кроме того, если  $V \leq 50$  м/с, то  $V' = (90 - V)$ , иначе  $V' = V$ .

Обработывая экспериментальные данные, полученные в современных условиях, методом А.Л. Бершадского, можно получить новые, более точные, выражения для расчета  $p$  и  $k$ .

2. Для случая срезания микрослоев ( $a \leq 0,1$  мм) автором статьи предложено аналитическое уравнение [7] для единичной касательной силы резания, Н:

$$F_{x1} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left( 1 - \frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a - \frac{0,01}{\lambda} \right) \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент:  $\lambda = \rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01$ ; где  $\rho_o$  – начальный радиус закругления режущей кромки, мм.

Единичная касательная сила резания, действующая по задней поверхности лезвия, Н:

$$F_{x13} = (\alpha_{\rho} p + 0,1k) \left( \frac{\rho}{\rho + 50} \right), \quad (8)$$

где  $\rho = \rho_o + \Delta\rho$ , мм.

3. Коэффициент затупления лезвия находится по формуле

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50} \quad (9)$$

Режущая кромка лезвия объединяет переднюю и заднюю поверхности в единое лезвие, поэтому коэффициент затупления режущей кромки отражает взаимовлияние параметров по передней грани ( $k$ ) и задней грани ( $p$ ).

4. Для учета неучтенных параметров режима резания в расчетном методе можно использовать поправочные коэффициенты на породу, влажность, пиление встречное или попутное. Тогда для продольного пиления круглыми пилами, например, удельную силу резания при  $a_c \geq 0,1$  мм можно определить по формуле

$$F_{y\partial} = a_n a_w a_b \left[ \frac{\alpha_{\rho} p}{a_c} + k + \frac{\alpha t}{b} \right], \quad (10)$$

где  $a_n$  – коэффициент учета породы древесины;

$a_w$  – коэффициент учета влажности;

$a_e$  – коэффициент вида пиления (встречное  $a_e = 1$ , попутное  $a_e = 1,1$ );

$\alpha_p$  – коэффициент затупления.

5. Анализируя эпюру нормальных давлений на лезвие, можно сделать вывод, что единичную силу  $F_{xn}$  по передней грани для срезаемого макрослоя можно найти как сумму площадей слоев эпюры по выражению [7]:

$$F_{xn} = 0,1k_m + k(a - 0,1).$$

Нормальную (радиальную) составляющую силы резания можно найти по уравнению:

$$F_{zn} = F_{xn} \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi) = 0,1 k_m \operatorname{tg}(90^\circ - \delta_m - \varphi_m) + k(a - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi),$$

где  $\delta$  – угол резания;

$\varphi$  – угол трения; коэффициент трения скольжения стружки по передней поверхности  $\mu = \operatorname{tg} \varphi$ .

Около режущей кромки угол резания  $\delta_m$  непрерывно изменяется:  $\delta \leq \delta_m \leq 90^\circ$ . В зоне высокого давления коэффициент трения убывает до минимального значения  $\mu = 0,18$  (угол трения  $\varphi_1 \cong 10^\circ$ ). При  $\delta_m = 90^\circ - \varphi_m$  первое слагаемое уравнения нормальной силы равно нулю, а в диапазоне  $\delta_m = (90^\circ - \varphi_m) \pm \varphi_m$  нормальная сила в микрослое тоже равна нулю. Поэтому ввиду малости первым слагаемым нормальной силы можно пренебречь. Тогда при  $a \geq 0,1$  мм

$$F_{zn} = k(a - 0,1) \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \quad (11)$$

при  $a < 0,1$  мм  $F_{zn} = 0$ .

6. При решении обратной задачи сначала находится значение параметра  $m_1$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b F_{x0,1}}, \quad (12)$$

где  $F_{x \text{ зуб}}$  – сила резания одним зубом режущего инструмента, Н;  $a_n$ ,  $a_w$  – поправочные коэффициенты на породу и влажность соответственно;

$b$  – ширина срезаемого слоя, мм;  $F_{x0,1} = \alpha_p p + 0,1k$ , Н.

Если значение  $m_1 \geq 1$ , то дальнейший расчет следует вести по уравнениям для макрослоев, при  $m_1 \leq 1$ , – по уравнениям для микрослоев. Для микрослоев толщина срезаемого слоя находится по выражению

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)}. \quad (13)$$

**Аналитический расчетный метод.** Метод создается механико-математическим направлением развития науки о резании древесины. Процесс резания рассматривается как технологическая система, изучаемая методами анализа и синтеза. При анализе процесс резания расчленяется на отдельные взаимосвязанные части, которые всесторонне изучаются, а при синтезе эти части объединяются в единое целое.

Аналитический расчетный метод создан М.А. Дешевым, С.А. Воскресенским и их учениками. В последние годы работа продолжается учеными Архангельского государственного технического университета В.В. Соловьевым, А.М. Моргачевым, Л.В. Орленко [8], которые заявляют, что разработали метод расчета сил резания древесины, основанный на представлении процесса резания как процесса ее разрушения. Процесс

отделения стружки рассматривается как последовательность двух стадий: формирования дефектов типа “трещина” и ее развитие. На первом этапе, в зоне внедрения лезвия, в древесине формируются области повреждений (смятие волокон, потеря их устойчивости, разрыв), которые можно рассматривать как области возникновения начальных трещин. На втором этапе происходит развитие наиболее опасной трещины в неустойчивом режиме.

В заключение отметим, что в современных условиях совершенствование расчетных методов в области резания древесины ведется в различных направлениях. Все они части единой теории резания древесины.

### Библиографический список

1. Гриневич, С.А. Разработка режимов цилиндрического фрезерования кромок фанеры общего назначения [Текст]: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук/ С.А. Гриневич; Минск: БГТУ, 2005. 19 с.
2. Грубе, А.Э. Основы теории и расчета деревообрабатывающих станков, машин и автоматических линий [Текст]: учебник/ А.Э. Грубе, В.И. Санев; М.: Лесн. пром-сть, 1973. 384 с.
3. Ивановский, Е.Г. Резание древесины [Текст]: учебное пособие/ Е.Г. Ивановский; М.: Лесн. пром-сть, 1975. 200 с.
4. Бершадский, А.Л. Резание древесины [Текст]: учебное пособие/ А.Л. Бершадский; М.: Гослесбумиздат, 1956. 328 с.
5. Соловьев А.А. Решение задач по резанию древесины [Текст]: учебное пособие/ А.А. Соловьев; М.: МЛТИ, 1981. 60 с.
6. Манжос, Ф.М. Дереворежущие станки [Текст]: учебник/ Ф.М. Манжос; М.: Лесн. пром-сть, 1974. 455 с.
7. Глебов, И.Т. Расчет режимов резания древесины [Текст]: монография/ И.Т. Глебов; Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 156 с.
8. Орленко, Л.В. К вопросу исследования процесса резания древесины [Текст] Л.В. Орленко, В.В. Соловьев, А.М. Моргачев; Лесной журнал № 4, 1997.

**Гришкевич А.А.** (БГТУ, г. Минск, РБ) [dosy@bstu.unibel.by](mailto:dosy@bstu.unibel.by)

### **РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЛЕЗВИЯ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОТ ДЕЙСТВИЯ ИЗГИБАЮЩЕЙ СИЛЫ** *ACCOUNT ON STRENGTH OF EDGE WOODCUTTING TOOL FROM ACTIVITY OF CURVING FORCE*

Износ режущего инструмента при обработке древесины и древесных материалов протекает весьма разнообразно в связи с различными условиями его эксплуатации. Эти условия могут резко изменяться в зависимости от обрабатываемого материала, геометрии и материала режущего инструмента, режимов резания, жесткости системы «станок-инструмент-деталь».