

ПРОНИКАНИЕ РЕЖУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА КОНЦЕВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

In this article the insinuating of the cutting element of the tip cutter is considered at processing wood materials. Experimental data and graphic dependences are resulted. Theoretically obtained values of a mean power on shearing are compared to outcomes of experiment. It is concluded a possibility of use of the obtained equations for approximated definition of the gains operating on cutting device of the end milling cutter and a potency on shearing at machining of wood materials. The obtained equations enable to develop more precisely rational conditions of maintenance of the final milling instrument and to conduct theoretical inspection of its strength.

Введение. Величина усилий, действующих на режущий элемент, проникающий в плитный материал при резании, определяются такими факторами, как геометрия резца, конструкция фрезы, режим обработки, тип плиты, наличие и способ отделки и др. Информационный поиск в отечественных и зарубежных источниках позволил сделать вывод об отсутствии работ, посвященных влиянию каждого из них. В связи с этим представленная работа содержит приближенное решение, позволяющее судить о характере процесса и осуществлять его анализ, сопоставляя с данными эксперимента.

1. Теоретическая часть. Рассматривается начальный период проникания, когда действующие усилия достигают наибольших значений. В связи с этим допускаются некоторые приближения:

1) угол между осью симметрии резца и поверхностью плиты α меняется незначительно, поэтому $\alpha = \text{const}$;

2) скорость режущего элемента направлена всегда по его оси симметрии, а величина ее не меняется, т. е. $v_0 = \text{const}$;

3) частицы плиты (древесные и клевые) двигаются только вдоль образующих поверхностей, нормальных к поверхности проникающего резца;

4) в точках перехода заточенной части резца в его тело происходит отрыв от материала плиты, следовательно, силы давления не действуют на свободную поверхность. Подтверждением этого является экспериментальный факт – как правило, на теле даже выработавшего ресурс резца отсутствует характерный износ;

5) механические свойства древесной плиты описываются моделью сжимаемой абразивной среды;

6) на величину сил давления оказывает влияние только динамический член, зависящий от квадрата скорости резца, его угловых параметров и механических свойств плиты (сжимаемости и внутреннего трения) [1].

Рассмотрим случай проникания острого резца под углом $\alpha < \pi/2 - \beta$. На рис. 1 представлена картина движения плитной среды в момент времени $t < t_1$, т. е. до встречи с плитой точки F .

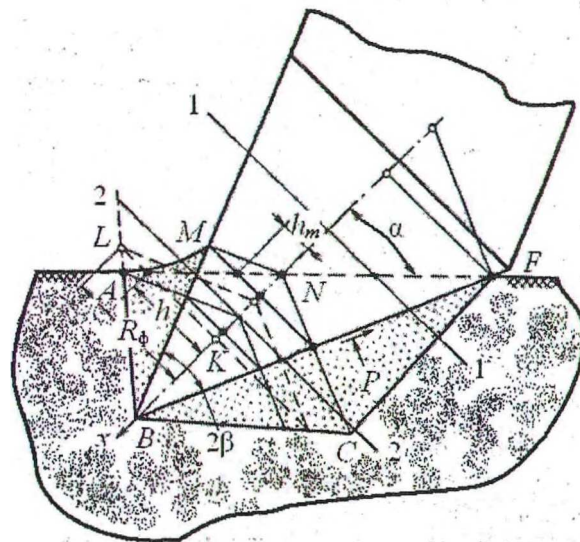


Рис. 1. Проникание резца концевой фрезы в плитный материал

Как видно из рисунка, для рассматриваемой задачи удобно область возмущенного движения вещества плиты разделить на три зоны.

В 1-й зоне, ограниченной фронтом ABC и траекторией, проходящей через точку A , лежащую на свободной поверхности, влияние последней на движение среды не происходит, поэтому давление, действующее на поверхность лезвия, будет симметрично относительно оси, как и в случае нормального удара. Следовательно, в этой зоне возможно появление только осевой составляющей сил давления, величина которой с учетом допущения 6 будет [1]:

$$F_{1x} = \pi \cdot p \cdot a_n^2, \\ a_n = (L - x_n) \cdot \text{tg} \beta, \quad (1)$$

где a_n – сечение резца; p – часть избыточного давления, равная члену, пропорциональному квадрату скорости; L – расстояние от центра масс проникающего резца до его вершины.

Начало координаты x помещено в центр масс резца. Если влияние поверхностного трения велико, например, в среде с крупными абразивными включениями (ДСтП), то осевая составляющая сил трения, действующая на резец в этой зоне, будет [2]

$$Q_{ix} = \mu_0 \cdot \pi \cdot p \cdot a_n^2 \cdot \text{ctg}\beta. \quad (2)$$

Полная осевая составляющая сил давления, действующих в 1-й зоне, будет равна

$$F_1 = \chi \cdot \pi \cdot (L - x_n)^2 \cdot p \cdot \text{tg}^2\beta, \quad (3)$$

где

$$\chi = 1 + \mu_0 \cdot \text{ctg}\beta. \quad (4)$$

Во второй зоне, лежащей между траекториями, проходящими соответственно через точки A и M (описывается углом θ_1^*), необходимо учесть влияние разгрузки со стороны свободной поверхности.

В данной зоне параметры движения среды, а следовательно, и давление на поверхности реза будут существенно зависеть от близости свободной поверхности. Можно показать, что давление, действующее на резец в этой зоне, существенно меньше давления, действующего на остальную часть поверхности [2].

Угол θ_1^* для разных траекторий будет различным. Значение косинуса этого угла равно:

$$\cos \theta_1^* = h_r / R_\phi, \quad (5)$$

где h_r – расстояние от оси x до первоначального положения свободной поверхности в плоскости, образованной пересечением поверхности фронта ударной волны с поверхностью рассматриваемой траектории (на рис. 1 эта плоскость показана штриховой линией LK); R_ϕ – радиус фронта ударной волны в этой плоскости.

Из рис. 1 также видно, что

$$h_r = k \cdot F \cdot \text{tg}\alpha; \quad k \cdot F = \omega - z + (R_\phi - a) \cdot \text{tg}\alpha;$$

$$\omega = B \cdot F = v_0 \cdot t; \quad z = L - x; \quad a = (L - x) \cdot t \cdot \text{tg}\beta.$$

Из закона сохранения массы следует, что

$$\frac{(H_\phi - h_0)}{(H - h_0)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta}}. \quad (6)$$

На рис. 1 показано, что так же будут относиться R_ϕ и a , т. е.

$$\frac{R_\phi}{a} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta}}. \quad (7)$$

И тогда можно записать, что

$$h_r = \left[\omega - z \left\{ 1 - \text{tg}^2\beta \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta}} - 1 \right) \right\} \right] \text{tg}\alpha. \quad (8)$$

Следовательно, выражение для $\cos \theta_1^*$ можно представить в виде

$$\cos \theta_1^* = \frac{\omega - z\lambda}{zs_1}, \quad (9)$$

где

$$s_1 = \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\alpha \cdot \sqrt{1 - \beta}}, \quad (10)$$

а символом λ обозначено

$$\lambda = 1 - \text{tg}^2\beta \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta}} - 1 \right). \quad (11)$$

При

$$z = z_n = \frac{\omega}{s_1 + \lambda} \cos \theta_1^* = 1; \quad (12)$$

$$z = z_m = \frac{\omega}{1 + \text{tg}^2\beta}, \quad \cos \theta_1^* = \text{tg}\beta \cdot \text{tg}\alpha. \quad (13)$$

Таким образом, в диапазоне изменения z от z_n до z_m θ_1^* меняется от 0 до $\arccos(\text{tg}\beta \cdot \text{tg}\alpha)$.

В третьей зоне, охватывающей движение среды по траекториям, лежащим выше MNC , площадь приложения нагрузки определяется поверхностью контакта проникающего реза с первоначальной поверхностью плиты.

В произвольном сечении $z_m < z < z_p$ эта поверхность ограничена углом, равным $(\pi - \theta_2^*)$. Значение $\cos \theta_2^*$ определяется так:

$$\cos \theta_2^* = \frac{h}{a} = \frac{\omega - z}{s \cdot z}; \quad s = \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\alpha}. \quad (14)$$

При

$$z = z_p = \frac{\omega}{1 - s} \quad \cos \theta_2^* = -1 \text{ и } \theta_2^* = \pi;$$

при

$$z = z_m \quad \cos \theta_2^* = \cos \theta_1^* = \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\beta.$$

Теперь, имея зависимости углов θ_1^* , θ_2^* от координаты z (9 и 14), можно определить усилия, действующие на проникающий в плиту резец.

Во второй зоне поперечное усилие, действующее в произвольном сечении $x_m < x < x_n$, равно

$$q = 2 \cdot p \cdot a \cdot dx \cdot \sin \theta_1^*. \quad (15)$$

Полную поперечную составляющую сил давления F_{2q} , возникающую в рассматриваемой зоне, определим, интегрируя (15) по x от $x = x_m$ до $x = x_n$:

$$\begin{aligned} F_{2q} &= 2p \cdot \text{tg}\beta \int_{x_m}^{x_n} (L - x) \sin \theta_1^* dx = \\ &= 2p \cdot \text{tg}\beta \int_{z_n}^{z_m} z \sqrt{1 - \frac{(\omega - z\lambda)^2}{z^2 \cdot s_1^2}} dz. \end{aligned} \quad (16)$$

Момент от усилий q относительно центра масс, стремящийся вытолкнуть тело в сторону свободной поверхности, будет равен [2]:

$$\begin{aligned} M_{2q} &= 2p \int_{x_m}^{x_n} a \cdot x \sin \theta_1^* dx = 2p \cdot \text{tg}\beta \times \\ &\times \left\{ L \int_{z_n}^{z_m} z \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz - \int_{z_n}^{z_m} z^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z s_1} \right)^2} dz \right\} \end{aligned}$$

Полную осевую составляющую сил давления F_{2x} представим в виде

$$F_{2x} = 2p \cdot \text{tg}^2\beta \int_{x_m}^{x_n} (L-x) (\pi - \theta_1^*) dx =$$

$$= 2p \cdot \text{tg}^2\beta \int_{z_n}^{z_m} z \left(\pi - \arccos \frac{\omega - z\lambda}{zs_1} \right) dz. \quad (17)$$

Момент от осевых усилий во всех сечениях $x_m < x < x_n$ выразится формулой

$$M_{2x} = 2p \cdot \text{tg}^3\beta \int_{x_m}^{x_n} (L-x)^2 \sin \theta_1^* dx =$$

$$= 2p \cdot \text{tg}^3\beta \int_{z_n}^{z_m} z^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{zs_1} \right)^2} dz. \quad (18)$$

Осевая сила от поверхностных сил трения представится так:

$$Q = 2\mu p \cdot \text{tg}\beta \int z \left(\pi - \arccos \frac{\omega - z\lambda}{zs} \right) dz. \quad (19)$$

Полная осевая сила от усилий давления и трения, возникающая в этой зоне, определится суммой сил F_{2x} и Q_{2x} :

$$F_2 = F_{2x} + Q_{2x} = 2p \cdot \text{tg}^3\beta \times$$

$$\times \int_{z_n}^{z_m} z \left(\pi - \arccos \frac{\omega - z\lambda}{zs_1} \right) dz. \quad (20)$$

Поперечная сила от поверхностных усилий трения и полная поперечная сила, очевидно, будут равны соответственно

$$Q_{2q} = 2\mu_0 p \cdot \text{tg}^2\beta \int_{z_n}^{z_m} z \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{zs_1} \right)^2} dz,$$

$$Q_2 = F_{2q} - Q_{2q} = 2p \cdot \text{tg}\beta (1 - \mu_0 \cdot \text{tg}\beta) \times$$

$$\times \int_{z_n}^{z_m} z \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz. \quad (21)$$

Момент от осевой составляющей сил трения:

$$\tilde{M}_{2x} = 2p \cdot \mu_0 \cdot \text{tg}^2\beta \int_{z_n}^{z_m} z^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz \quad (22)$$

и момент от поперечной составляющей сил трения

$$\tilde{M}_{2q} =$$

$$= 2p \cdot \mu_0 \cdot \text{tg}^2\beta \int_{z_n}^{z_m} z(L-z) \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz \quad (23)$$

вместе с моментом от осевой составляющей сил давления образуют восстанавливающий момент, стремящийся повернуть проникающий

резец перпендикулярно свободной поверхности.

Следовательно, нормализующий момент представится суммой

$$M_{2H} = \tilde{M}_{2x} + \tilde{M}_{2q} + M_{2x} =$$

$$= 2p \cdot \text{tg}^2\beta \left\{ (\mu_0 + \text{tg}\beta) \int_{z_n}^{z_m} z^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz \right\} +$$

$$+ \mu_0 \int_{z_n}^{z_m} z \cdot (L-z) \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{zs_1} \right)^2} dz. \quad (24)$$

Полный результирующий момент от всех сил будет равен:

$$M_2 = M_{2q} - M_{2H} =$$

$$= 2p \cdot \text{tg}\beta \left\{ \delta L \int_{z_n}^{z_m} z \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz - \right.$$

$$\left. \left\{ -\psi \int_{z_n}^{z_m} z^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\omega - z\lambda}{z \cdot s_1} \right)^2} dz \right\} \right\}, \quad (25)$$

где

$$\delta = 1 - \mu_0 \cdot \text{tg}\beta; \quad \psi = \delta + \chi \cdot \text{tg}^2\beta.$$

Таким образом, силы и момент, действующие на резец во 2-й зоне:

$$F_{2x} = 2p \cdot \text{tg}^2\beta \cdot \chi \cdot \omega^2 \int_{\tau_n}^{\tau_m} \tau \left(\pi - \arccos \frac{1 - \tau\lambda}{\tau s_1} \right) d\tau.$$

$$Q_2 = 2 \cdot p \cdot \text{tg}\beta \cdot \delta \cdot \omega^2 \int_{\tau_n}^{\tau_m} \tau \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \tau\lambda}{\tau \cdot s_1} \right)^2} d\tau$$

$$M_2 = 2 \cdot p \cdot \text{tg}\beta \left\{ \delta \cdot L \cdot \omega^2 \int_{\tau_n}^{\tau_m} \tau \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \tau\lambda}{\tau \cdot s_1} \right)^2} d\tau - \right.$$

$$\left. \left\{ -\psi \cdot \omega^3 \int_{\tau_n}^{\tau_m} \tau^2 \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \tau\lambda}{\tau \cdot s_1} \right)^2} d\tau \right\} \right\}.$$

Для третьей зоны действующие на резец усилия и моменты определяются аналогично.

Имеем окончательные выражения полной осевой силы, поперечной силы и результирующего момента, действующих на резец в данной зоне:

$$F_3 = 2 \cdot \chi \cdot p \cdot \text{tg}^2\beta \cdot \omega^2 \int_{\tau_m}^{\tau_n} \tau \left(\pi - \arccos \frac{1 - \tau}{\tau s} \right) d\tau.$$

$$Q_3 = 2 \cdot \delta \cdot p \cdot \text{tg}\beta \cdot \omega^2 \int_{\tau_m}^{\tau_n} \tau \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \tau}{\tau \cdot s} \right)^2} d\tau.$$

$$M_3 = 2 \cdot p \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \left[\delta \cdot L \cdot \omega^2 \int_{\tau_m}^{\tau_p} \tau \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \tau}{\tau \cdot s} \right)^2} d\tau - \right. \\ \left. \left[-\psi \cdot \omega^3 \int_{\tau_m}^{\tau_p} \tau^2 \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \tau}{\tau \cdot s} \right)^2} d\tau \right] \right]$$

где

$$\tau_p = \frac{z_p}{\omega} = \frac{1}{1 - s};$$

$$\tau_m = \frac{z_m}{\omega} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}.$$

Таким образом, по результирующему усилию, действующему на резец, и скорости резания можем определить теоретическую мощность, расходуемую на резание.

2. Методика проведения эксперимента.

На кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов был проведен эксперимент по определению средней мощности на резание $P_{\text{ср}}$ в зависимости от частоты вращения (3000–18 000 мин⁻¹) однозубой сборной концевой фрезы диаметром 21 мм для различных величин толщины стружки (0,1–1,6 мм). Угол заострения использованных острых режущих элементов 55°. Обрабатываемый материал – облицованная с обеих сторон полимером древесностружечная плита толщиной 25 мм. Экспериментальная установка – деревообрабатывающий центр с числовым программным управлением Rover B, оснащенный аналого-цифровым преобразователем и программным обеспечением для регистрации средней мощности на резание.

3. Результаты эксперимента. На рис. 2 представлены графические зависимости, полученные по экспериментальным данным.

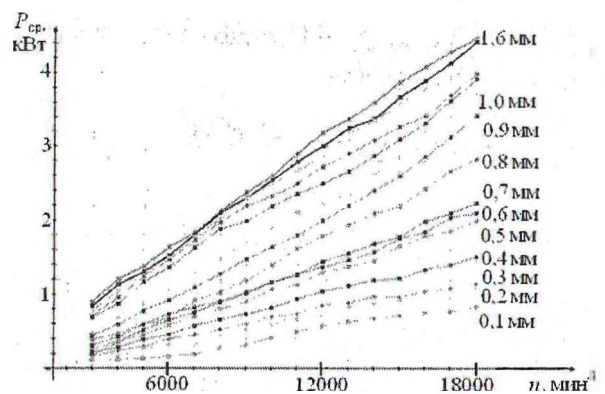


Рис. 2. Зависимость средней потребляемой мощности на обработку от частоты вращения фрезы для различных средних толщин стружки

Выводы. Сопоставление экспериментальных и полученных по уравнениям данной работы величин мощности на резание показали:

- 1) теоретические данные достаточно точно описывают экспериментальные кривые;
- 2) теоретические мощности для всех сопоставляемых значений превышают экспериментальные на 7–12%. Это объясняется в первую очередь тем, что полученные уравнения не учитывают некоторое падение скорости по мере проникания режущего элемента в обрабатываемый материал.

Проведенный эксперимент свидетельствует о возможности применения полученных уравнений для приближенного определения нагрузок, действующих на режущий элемент концевой фрезы при обработке плитных древесных материалов.

Литература

1. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1989.
2. Костров, Б. В. Некоторые динамические задачи математической теории упругости / Б. В. Костров. – М.: Высшая школа, 1997.