

УДК 664.05:621.9.02

А. А. Гришкевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);
С. С. Макаревич, кандидат технических наук, профессор (БГТУ)

ДЕРЕВОРЕЖУЩИЙ ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ УГЛАМИ РЕЗАНИЯ НОЖЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ОПОРЕ КАЧЕНИЯ

В статье приводятся результаты теоретических исследований работоспособности дереворежущих фрез. Анализируется фрезерный инструмент с изменяемыми углами резания ножей. Определены условия изменения угла резания ножей фрезерного инструмента.

The article focuses on theoretical research on the operational capacity of wood cutting milling tools with adjustable cutting angles, the cutters being rolling beared. The milling tool with changeable corners of cutting of knives is analyzed. The conditions for adjustment of cutting angles have been determined.

Введение. Производительная и качественная обработка материала в значительной степени зависит от конструкции и состояния режущего инструмента. Режущий инструмент является одним из факторов, который ведет к увеличению производительности обработки, к новым конструкциям оборудования и рациональным режимам резания. Современные достижения наглядно подтверждают прогрессивное значение режущего инструмента: применение новых марок инструментальных сталей, твердого сплава, использование резцов с многогранными твердосплавными пластинками одноразового использования, сверхтвердыми и алмазными материалами и т. д.

В настоящее время отсутствуют исчерпывающие сведения о физико-механических свойствах древесины и древесных плитных материалах, обладающих ярко выраженной анизотропией. Важными факторами, влияющими на обрабатываемость этих материалов и зависящими от их физико-механических свойств, являются режимы резания (скорость главного движения, подачи), линейные характеристики инструмента и так далее, определяющие качество и точность обработки. В конечном счете указанные факторы приобретают решающее значение в вопросах выбора угловых параметров режущих инструментов.

Даже теоретически, не говоря уже о практической стороне вопроса, невозможно учесть всех факторов, влияющих на процесс резания материалов. Поэтому должна работать саморегулируемая обратная связь между процессом резания и машиной, обеспечивающая оптимизацию этого процесса, которую можно представить зависимостью

$$F_x \cdot V_e = U \cdot I \cdot \cos\varphi = P \rightarrow \min,$$

где F_x – касательная сила резания (главная составляющая силы резания), Н; V_e – скорость резания, м/с; U – электрическое напряжение, В;

I – сила электрического тока, А; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; P – полезная мощность на резание, Вт.

Целью данной работы является проведение теоретических исследований для разработки дереворежущего инструмента с саморегулирующимися ножами, которое даст возможность обрабатывать древесину и древесные материалы с минимальными энергетическими затратами при обеспечении установленного качества поверхности резания, определить условия его работы.

Основная часть. Теоретические исследования. Ранее были рассмотрены конструкции насадных фрез с изменяемыми углами резания, которые имели закрепленные в корпусе ножедержатели, имеющие возможность перемещаться относительно корпуса. [1, 2]. Рассмотрим конструкцию фрезы, в которой между ножедержателем и корпусом фрезы установлены подшипники (опоры качения) (рис. 1, а, б).

Если ножедержатель установлен симметрично относительно оси Y (рис. 1, а), то центр массы его находится в точке C_0 с координатами x_{c0}, y_{c0} относительно точки O . В этом случае при установившемся равномерном вращении фрезы вокруг точки O_1 в отсутствие резания на ножедержатель будут действовать центробежная сила F_n , приложенная в точке C_0 и направленная по радиусу от точки O_1 во внешнюю сторону. При этом

$$F_n = m \cdot r_0 \cdot \omega_0^2, \quad (1)$$

где m – масса ножедержателя, кг; ω_0 – угловая скорость вращения фрезы, 1/с; r_0 – расстояние от центра вращения O_1 до центра масс ножедержателя C_0 , мм;

$$r_0 = \sqrt{(R_0 - y_{c0})^2 + x_{c0}^2}, \quad (2)$$

где R_0 – радиус, который описывает режущая кромка ножа.

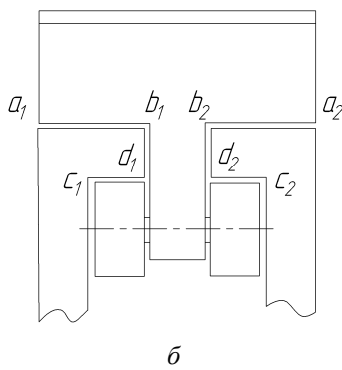
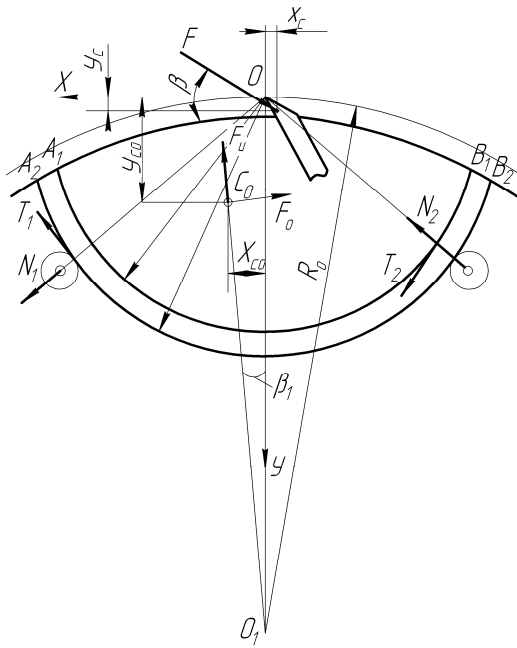


Рис. 1. Ножедержатель

Определим напряжения, возникающие в ножедержателе от центробежной силы инерции. Для этого ножедержатель будем рассматривать как клин с вершиной в точке O , нагруженный силой F_n в точке C_0 (рис. 2). Из клина выделим элемент с радиальными и цилиндрическими сечениями. По граням выделенного элемента могут возникать радиальные σ_r , окружные σ_θ и касательные $\tau_{r\theta}$ напряжения (рис. 2).

Как и в работе [2], задачу будем решать с помощью функции напряжений Эри [3, 4].

$$\varphi = Ar\theta \sin \theta + Br\theta \cos \theta + C\theta + D \sin 2\theta,$$

через которую напряжения запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2}{r} (A \cos \theta - B \sin \theta) - \frac{4D}{r^2} \sin 2\theta, \\ \sigma_\theta &= 0, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{r^2} (C + 2D \cos 2\theta). \end{aligned} \right\} (3)$$

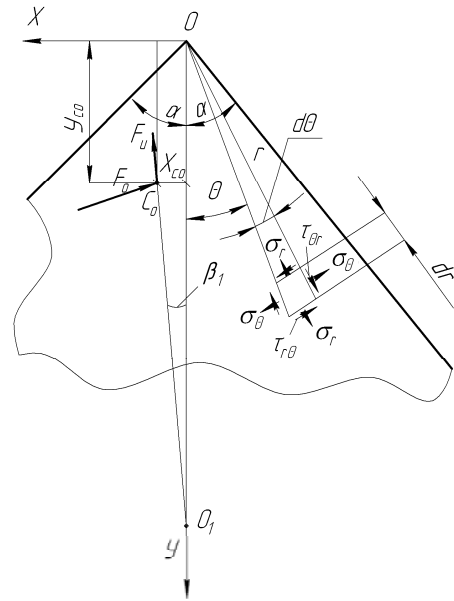


Рис. 2. Расчетная схема ножедержателя

Для определения постоянных $ABCD$ запишем краевое условие $\tau_{r\theta}(\theta = \pm\alpha) = 0$, которое дает:

$$C + 2D \cos 2\alpha = 0. \quad (4)$$

Кроме того, запишем условие равновесия части клина, выделенной цилиндрическим сечением радиусом r .

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= -b \int_{-\alpha}^{\alpha} r \sigma_r \sin \theta \cdot d\theta - \\ &- b \int_{-\alpha}^{\alpha} r \tau_{r\theta} \cos \theta \cdot d\theta + F_n \sin \beta_1 = 0, \\ \sum Y &= b \int_{-\alpha}^{\alpha} r \sigma_r \cos \theta \cdot d\theta - \\ &- b \int_{-\alpha}^{\alpha} r \tau_{r\theta} \sin \theta \cdot d\theta + F_n \cos \beta_1 = 0, \\ \sum m_0 &= b \int_{-\alpha}^{\alpha} r^2 \tau_{r\theta} \cdot d\theta - F_n x_{c0} \cdot \cos \beta_1 - \\ &- F_n y_{c0} \cdot \sin \beta_1 = 0, \end{aligned} \right\} (5)$$

где b – ширина ножедержателя на расстоянии r от начала координат O .

После подстановки напряжений согласно (3) и интегрирования получим:

$$\left. \begin{aligned} B(2\alpha - \sin 2\alpha) + \frac{4D}{r} (2 \sin^3 \alpha - \sin \alpha) - \\ - \frac{2C}{r} \sin \alpha + \frac{F_n}{b} \sin \beta_1 = 0, \\ A(2\alpha + \sin 2\alpha) - \frac{F_n}{b} \cos \beta_1 = 0, \\ 2C\alpha + D \sin 2\alpha - \frac{F_n}{b} (x_{c0} \cos \beta_1 + y_{c0} \sin \beta_1) = 0. \end{aligned} \right\} (6)$$

Из уравнений (4) и (6) определим постоянные интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{F_n \cdot \cos \beta_1}{b(2\alpha + \sin 2\alpha)}, \\ B &= \frac{-F_n \cdot \sin \beta_1}{b(2\alpha - \sin 2\alpha)}, \\ C &= \frac{F_n \cdot (x_{c0} \cdot \cos \beta_1 + y_{c0} \cdot \sin \beta_1) \cos 2\alpha}{b(2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)}, \\ D &= \frac{-F_n \cdot (y_{c0} \cdot \sin \beta_1 + x_{c0} \cdot \cos \beta_1)}{2b(2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)}. \end{aligned} \right\} (7)$$

Подставив (7) в (3), найдем напряжения, возникающие в ножедержателе от центробежной силы F_n :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(u)} &= \frac{2F_n}{b \cdot r} \left(\frac{\cos \beta_1 \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{\sin \beta_1 \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right) + \\ &+ \frac{2F_n}{b \cdot r^2} \cdot \frac{(x_{c0} \cdot \cos \beta_1 + y_{c0} \cdot \sin \beta_1) \sin 2\theta}{2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha}, \\ \tau_{r\theta(u)} &= \frac{F_n}{b \cdot r^2} \cdot \frac{x_{c0} \cdot \cos \beta_1 + y_{c0} \cdot \sin \beta_1}{2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha} \times \\ &\times (\cos 2\alpha - \cos 2\theta). \end{aligned} \right\} (8)$$

Если центр тяжести ножедержателя лежит на оси Y , то $\beta_1 = 0$, $x_{c0} = 0$ и

$$\sigma_{r(u)} = \frac{2F_n}{b \cdot r} \cdot \frac{\cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha}, \quad \tau_{r\theta(u)} = 0.$$

Формулы (8) дают возможность определить напряжение при установившемся вращательном движении с постоянной угловой скоростью ω_0 .

При пуске скорость постоянно растет от нуля до ω_0 за время t_0 .

При некотором времени $t < t_0$ фреза вращается с угловой скоростью $\omega < \omega_0$. Соответственно центробежная сила инерции $F_{n(t)} = m \cdot r_0 \cdot \omega^2$. Напряжения от центробежной силы инерции при $t < t_0$ будут определяться по формулам (8) с заменой F_n на $F_{n(t)}$.

При пуске и остановке появляется угловое ускорение ε , а следовательно, и окружная сила инерции F_0 :

$$F_0 = m \cdot a_t,$$

где m – масса ножедержателя, кг; a_t – окружное ускорение, m/c^2 .

Если фреза набирает скорость равномерно, то:

$$\varepsilon = \frac{\omega_0}{t_0}, \quad a_t = \varepsilon \cdot r_0,$$

где t_0 – время за которое фреза набирает постоянную угловую скорость ω_0 , с.

Окружная сила инерции приложена в точке C_0 перпендикулярно O_1C_0 (рис. 2). На рис. 2 направление этой силы показано при наборе ско-

рости. При остановке сила F_0 будет направлена в противоположную сторону.

Напряжения, возникающие в цилиндрическом сечении ножедержателя от силы F_0 , определяются аналогично тому, как они были определены от центробежной силы инерции F_n , и будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(0)} &= \frac{2F_0}{b \cdot r} \left(\frac{\sin \beta_1 \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} - \frac{\cos \beta_1 \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right) - \\ &- \frac{2F_0}{b \cdot r^2} \cdot \frac{(x_{c0} \cdot \sin \beta_1 - y_{c0} \cdot \cos \beta_1) \sin 2\theta}{2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha}, \\ \tau_{r\theta(0)} &= \frac{F_0}{b \cdot r^2} \cdot \frac{x_{c0} \cdot \sin \beta_1 - y_{c0} \cdot \cos \beta_1}{2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha} \times \\ &\times (\cos 2\alpha - \cos 2\theta), \\ \sigma_{\theta(0)} &= 0. \end{aligned} \right\} (9)$$

Если считать, что фреза набирает скорость равномерно, то в начальный период времени угловая скорость вращения мала, а следовательно, мала центробежная сила инерции и малы нормальные напряжения $\sigma_{r(u)}$. Напряжения $\sigma_{r(u)}$ будут положительными, поэтому ножедержатель будет давить на корпус фрезы через ролики. При этом силы трения качения, направленные по касательной к цилиндрическому сечению, тоже будут очень малы. В то же время окружная сила инерции в период $0 < t < t_0$ остается постоянной и довольно большой. Большими будут и касательные напряжения $\tau_{r\theta(0)}$, определяемые формулой (9). Поэтому в начальный момент пуска очень вероятен выброс ножедержателя из корпуса фрезы. Чтобы этого не случилось, должны быть установлены ограничители. Когда фреза набрала скорость и вращается с постоянной скоростью ω_0 , то напряжения $\sigma_{r(0)}$ и $\tau_{r\theta(0)}$ отсутствуют. Напряжения $\sigma_{r(u)}$ имеют положительные значения; ножедержатель давит на корпус фрезы через ролики; возникающие силы трения качения невелики и ножедержатель стремится занять то положение, при котором $\beta_1 \rightarrow 0$.

В дальнейшем фреза вступает в рабочее состояние и появляется сила резания.

От силы резания F в цилиндрическом сечении ножедержателя будут возникать напряжения, определяемые зависимостями [10]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{2F}{b \cdot r} \left(\frac{\sin \beta \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{\cos \beta \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right) + \\ &+ \frac{(y_c \cdot \cos \beta + x_c \cdot \sin \beta) \sin 2\theta}{r(2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)}, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{F}{b \cdot r^2} \cdot \frac{y_c \cdot \cos \beta + x_c \cdot \sin \beta}{2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha} \times \\ &\times (\cos 2\theta - \cos 2\alpha), \\ \sigma_\theta &= 0. \end{aligned} \right\} (10)$$

где x_c, y_c – координаты точки приложения силы F (рис. 1); β – угол, под которым направлена сила F к оси X (рис. 1).

При фрезеровании с установившейся угловой скоростью вращения фрезы ω_0 напряжения будут суммироваться от силы резания F и от центробежной силы инерции $F_{и}$.

Складывая напряжения, определяемые выражениями (8) и (10), получим:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2}{b \cdot r} \left(\frac{(F_{и} \cos \beta_1 - F \sin \beta) \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \right. \\ &+ \left. \frac{(F_{и} \sin \beta_1 - F \cos \beta) \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right) + \\ &+ \frac{2\eta \cdot \sin 2\theta}{br^2 (2\alpha \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)}, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\eta}{b \cdot r^2} \cdot \frac{\cos 2\alpha - \cos 2\theta}{2\alpha \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha}. \end{aligned} \right\} (11)$$

где

$$\eta = F_{и} \cdot x_{c0} \cdot \cos \beta_1 - F \cdot x_c \cdot \sin \beta + F_{и} \cdot y_{c0} \cdot \sin \beta_1 - F \cdot y_c \cdot \cos \beta. \quad (12)$$

Касательные напряжения на границе ножедержателя с корпусом фрезы, то есть в цилиндрическом сечении корпуса ножедержателя, будут равны нулю, если $\eta = 0$, или

$$F_{и} \cdot x_{c0} \cdot \cos \beta_1 - F \cdot x_c \cdot \sin \beta + F_{и} \cdot y_{c0} \cdot \sin \beta_1 - F \cdot y_c \cdot \cos \beta = 0. \quad (13)$$

Если центр масс ножедержателя вместе с резцом и его креплением лежит на оси Y , то $\beta_1 = 0$, $x_{c0} = 0$ и условие (13) примет вид:

$$F \cdot x_c \cdot \sin \beta + F \cdot y_c \cdot \cos \beta = 0,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{y_c}{x_c}. \quad (14)$$

Это возможно только тогда, когда сила F проходит через начало координат, то есть через режущую кромку лезвия.

Если центр масс ножедержателя вместе с резцом не лежит на оси Y , то при отсутствии касательных напряжений сила резания F не будет проходить через режущую кромку лезвия, а будет отклонена от нее на некоторую величину:

$$h = y_c \cdot \cos \beta + x_c \cdot \sin \beta. \quad (15)$$

Перепишем уравнение (13) в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_{и} (x_{c0} \cdot \cos \beta_1 + y_{c0} \cdot \sin \beta_1) &= \\ &= F (x_c \cdot \sin \beta + y_c \cdot \cos \beta). \end{aligned} \quad (16)$$

При известных $F_{и}$, x_{c0} , y_{c0} и β_1 в левой части уравнения (16) мы имеем конкретную величину. Обозначим ее M .

$$M = F_{и} (x_{c0} \cdot \cos \beta_1 + y_{c0} \cdot \sin \beta_1).$$

Тогда, согласно (16)

$$F (x_c \cdot \sin \beta + y_c \cdot \cos \beta) = M. \quad (17)$$

Из уравнения (17) при известных F , x_c , y_c и M можно определить β , а по уравнению (15) отклонение силы F от начала координат.

При сборке фрезы нет возможности установить ножедержатель так, чтобы удовлетворялись условия (14) и (17). Если нет сил трения между ножедержателем и корпусом фрезы, то ножедержатель сам будет поворачиваться и занимать такое положение, при котором между ним и корпусом фрезы отсутствуют касательные напряжения. Но избавиться от сил трения невозможно. Поэтому пошли по пути их уменьшения. Между ножедержателем и корпусом фрезы установили подшипники (рис. 1, б). На участках дуги соединения ножедержателя с корпусом фрезы, где радиальные напряжения σ_r отрицательные и соответствующие им реактивные силы от корпуса фрезы направлены к точке O (началу координат), будет трение скольжения по выступам a_1b_1 и a_2b_2 (рис. 1, б), а на участках, где радиальные напряжения σ_r положительные и соответствующие им реактивные силы направлены от точки O , будет трение качения по выступам c_1d_1 и c_2d_2 . Уменьшение сил трения дает возможность ножедержателю занять положение, при котором отклонение силы резания F от острого ножа будет очень малым. Чем меньше отклонение силы резания F от режущей кромки лезвия, тем благоприятнее условие резания.

Желательно распределение массы ножедержателя подобрать так, чтобы при его симметричном расположении относительно оси Y центр масс находился на этой оси.

Выводы. 1. Как было показано выше, в начальный момент времени при пуске возможен выброс ножедержателя из корпуса фрезы.

2. При установившемся вращательном движении с постоянной угловой скоростью ω_0 в цилиндрическом сечении A_2B_2 (рис. 1, а) возникают положительные радиальные и касательные напряжения, определяемые формулами (8) с подстановкой $r = R_2$ (рис. 3).

В этом случае давление от ножедержателя на корпус фрезы будет передаваться только через ролики. В результате будут возникать нормальные реакции N_1 и N_2 и силы трения качения $T_1 = N_1n$ и $T_2 = N_2n$, где n – коэффициент трения качения, N_1 и N_2 определяются из условия равновесия (рис. 3, а):

$$\sum X = 0; \quad \begin{aligned} F_{и} \cdot \sin \beta_1 - N_1 \cdot \sin 30^\circ + N_2 \cdot \sin 30^\circ + \\ + T_1 \cdot \cos 30^\circ + T_2 \cdot \cos 30^\circ = 0; \end{aligned}$$

$$\sum Y = 0; \quad \begin{aligned} -F_{и} \cdot \cos \beta_1 - N_1 \cdot \cos 30^\circ - N_2 \cdot \cos 30^\circ - \\ - T_1 \cdot \sin 30^\circ + T_2 \cdot \sin 30^\circ = 0. \end{aligned}$$

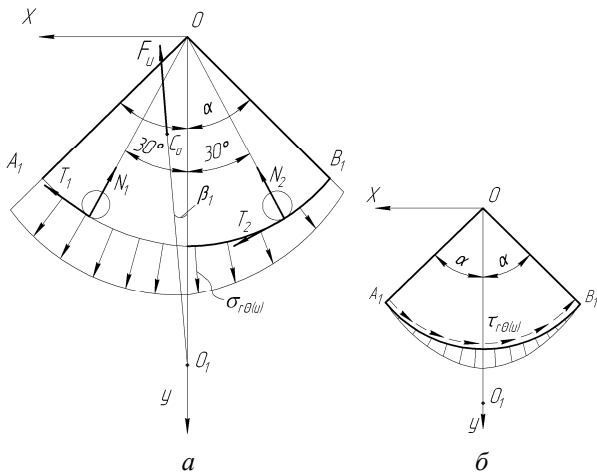


Рис. 3. Напряжения от центробежной силы инерции: а – радиальные; б – касательные

Подставив $T_1 = N_1 n$ и $T_2 = N_2 n$, получим

$$\begin{cases} F_u \cdot \sin \beta_1 - N_1 \cdot \sin 30^\circ + N_2 \cdot \sin 30^\circ + \\ + N_1 \cdot n \cdot \cos 30^\circ + N_2 \cdot n \cdot \cos 30^\circ = 0, \\ -F_u \cdot \cos \beta_1 - N_1 \cdot \cos 30^\circ - N_2 \cdot \cos 30^\circ - \\ - N_1 \cdot n \cdot \sin 30^\circ + N_2 \cdot n \cdot \sin 30^\circ = 0. \end{cases}$$

Из полученной системы уравнений определяется N_1 и N_2 через F_u .

Касательные напряжения будут стремиться сдвинуть ножедержатель относительно корпуса фрезы. Определим суммарную сдвигающую силу по сечению $A_1 B_1$

$$T = 2 \int_0^\alpha b \tau_{r\theta(n)} R_2 d\theta = 2 \int_0^\alpha \frac{F_u}{R_2} \cdot \frac{x_{c0} \cos \beta_1 + y_{c0} \sin \beta_1}{2\alpha \cos 2\alpha - \sin 2\alpha} \times (\cos 2\alpha - \cos 2\theta) d\theta = \frac{F_u}{R_2} (x_{c0} \cos \beta_1 + y_{c0} \sin \beta_1).$$

Сдвиг будет происходить до тех пор, пока $T > T_1 + T_2$.

При сдвиге ножедержателя относительно корпуса фрезы угол β_1 будет уменьшаться и при некотором $\beta_1 = \beta_1^*$ окажется, что $T = T_1 + T_2$, и сдвиг прекратится. Следовательно, β_1^* определяется из условия $T = T_1 + T_2$.

Угол β_1^* очень мал и зависит от того, как распределяется масса ножедержателя относительно оси Y .

3. При фрезеровании с установившейся угловой скоростью ω_0 кроме центробежной силы инерции F_u появляется сила резания F , и напряжения в цилиндрическом сечении определяются формулами (11). Выше рассмотрен случай, когда в цилиндрическом сечении на границе ножедержателя и корпуса фрезы касательные напряжения равны нулю. Но этого быть не может, так как имеются силы трения. В зависимости от соотношения сил F_u и F могут быть два варианта:

а) на границе между ножедержателем и корпусом фрезы радиальные нормальные напряжения только положительные (рис. 4, а);

б) на некотором участке радиальные напряжения положительные, а на остальном – отрицательные (рис. 4, б).

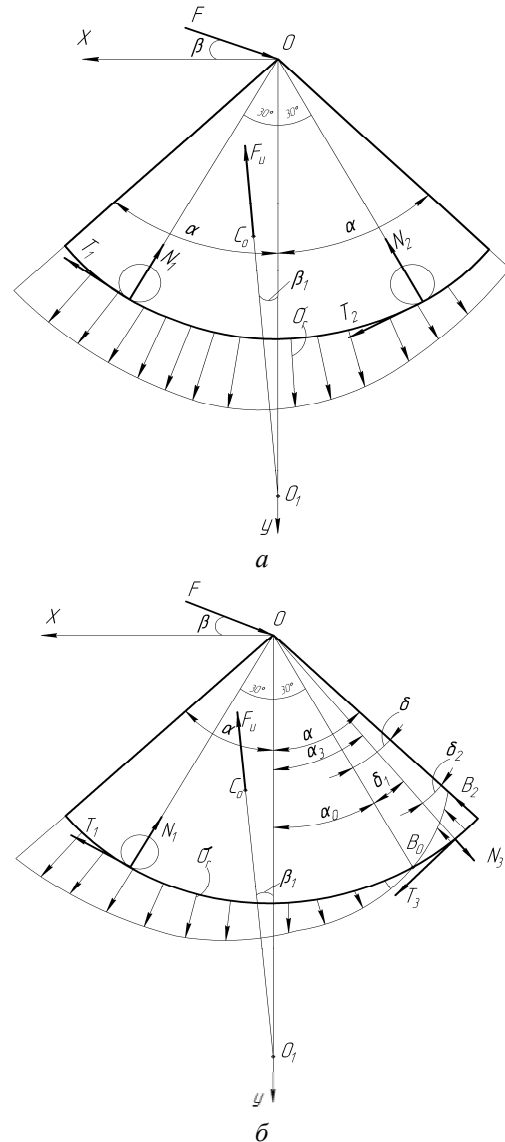


Рис. 4. Напряжения в цилиндрическом сечении при фрезеровании: а – σ_r только положительные; б – σ_r положительные и отрицательные

В первом случае ножедержатель давит на ролики и появляются нормальные реакции N_1 и N_2 , направленные по радиусам к началу координат O (рис. 4, а). Уравнения равновесия для системы сил, показанных на рис. 4, а:

$$\begin{cases} \sum X = 0; & F_u \cdot \sin \beta_1 - F \cdot \cos \beta - N_1 \cdot \sin 30^\circ + \\ & + N_2 \cdot \sin 30^\circ + T_1 \cdot \cos 30^\circ + T_2 \cdot \cos 30^\circ = 0, \\ \sum Y = 0; & -F_u \cdot \cos \beta_1 + F \cdot \sin \beta - N_1 \cdot \cos 30^\circ - \\ & - N_2 \cdot \cos 30^\circ - T_1 \cdot \sin 30^\circ + T_2 \cdot \sin 30^\circ = 0. \end{cases}$$

Подставив $T_1 = N_1 n$ и $T_2 = N_2 n$, из полученной системы уравнений определим N_1 и N_2 через F_n и F .

Между роликами и опорными плоскостями $c_1 d_1$ и $c_2 d_2$ будут возникать силы трения качения T_1 и T_2 . При этом $T_1 = N_1 n$, $T_2 = N_2 n$.

Силы трения будут уравновешиваться касательными напряжениями в цилиндрическом сечении с радиусом $r = R_2$. Равнодействующая касательных напряжений

$$T = 2 \int_0^{\alpha} b \cdot \tau_{r\theta} R_2 d\theta.$$

Подставив $\tau_{r\theta}$ согласно (11) и проинтегрировав, получим

$$T = \frac{\eta}{R_2}. \quad (18)$$

Если $|T| > T_1 + T_2$, то ножедержатель будет поворачиваться вокруг точки O до тех пор, пока не установится равенство $T = T_1 + T_2$.

Во втором случае ножедержатель слева опирается на ролик, а справа на участке $B_0 B_1$ опирается на цилиндрические поверхности по образующим $a_1 b_1$ и $a_2 b_2$. Слева ролик будет испытывать нормальное давление N_1 , направленное по радиусу к началу координат, справа будет возникать реакция N_3 , приложенная к центру эпилоры радиальных напряжений на участке $B_0 B_2$ и направленная по радиусу от начала координат (рис. 4, б). Угол α_0 определится из условия:

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{2}{b \cdot R_2} \frac{(F_n \cos \beta_1 - F \sin \beta) \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \\ & + \frac{2}{b \cdot R_2} \frac{(F_n \sin \beta_1 - F \cos \beta) \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} + \\ & + \frac{2\eta \cdot \sin 2\theta}{b R_2^2 (2\alpha \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)} = 0. \end{aligned}$$

Учтем, что $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cdot \cos \theta$, и разделим обе части равенства на $\cos \theta$:

$$\begin{aligned} \frac{F_n \cos \beta_1 - F \sin \beta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{(F_n \sin \beta_1 - F \cos \beta) \operatorname{tg} \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} + \\ + \frac{2\eta \cdot \operatorname{tg} \theta}{R_2 (2\alpha \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)} = 0. \end{aligned}$$

Откуда $\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \alpha_0 =$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{F_n \cos \beta_1 - F \sin \beta}{2\alpha + \sin 2\alpha} \right) \\ = & - \left(\frac{F_n \sin \beta_1 - F \cos \beta}{2\alpha - \sin 2\alpha} + \frac{2\eta}{R_2 (2\alpha \cos 2\alpha - \sin 2\alpha)} \right) = 0. \end{aligned}$$

В точках приложения нормальных реакций будут возникать силы трения:

$$T_1 = N_1 \cdot n, \quad T_3 = N_3 \cdot k,$$

где k – коэффициент трения скольжения.

Как и в первом случае, ножедержатель будет поворачиваться, пока сила T , определяемая формулой (18), будет больше суммы сил сопротивления $T_1 + T_3$. Реакции N_1 и N_2 определяются из условия равновесия.

С достаточной точностью можно считать, что центр эпилоры σ_r на участке $B_0 B_2$ расположен под углом $\delta_1 \approx \frac{2}{3} \delta$ от B_0 и под углом $\delta_2 \approx \frac{1}{3} \delta$ от B_1 . Тогда $\alpha_3 = \alpha - \frac{1}{3} \delta$, где $\delta = \alpha - \alpha_0$.

Запишем уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \sum X = 0; & F_n \cdot \sin \beta_1 - F \cdot \cos \beta - N_1 \cdot \sin 30^\circ - \\ & - N_3 \sin \alpha_3 + T_1 \cdot \cos 30^\circ + T_3 \cdot \cos \alpha_3 = 0; \\ \sum Y = 0; & -F_n \cdot \cos \beta_1 + F \cdot \sin \beta - N_1 \cdot \cos 30^\circ + \\ & + N_3 \cdot \cos \alpha_3 - T_1 \cdot \sin 30^\circ + T_3 \cdot \sin \alpha_3 = 0. \end{cases}$$

Подставив $T_1 = N_1 \cdot n$ и $T_3 = N_3 \cdot k$, из полученной системы уравнений определим N_1 и N_3 через F_n и F .

Смещение ножедержателя прекратится при условии $T = T_1 + T_3$.

Закключение. Таким образом, в любом случае ввиду наличия сил трения и смещения центра масс ножедержателя от оси Y , сила резания F не будет проходить через начало координат, то есть через режущую кромку лезвия, а будет отстоять от нее на небольшом расстоянии h . Чем меньше сила трения, тем меньше h и сила резания F ближе к режущей кромке лезвия, что благоприятно влияет на работу фрезы, на качество обработки.

Литература

1. Использование силовых воздействий на элементы сборной фрезы при разработке рефлекторных самонастраивающихся инструментов / А. А. Гришкевич [и др.] // Материалы, технологии, инструменты: междунар. науч.-техн. журн. – 2007. – Т. 11, № 12. – С. 85–91.

2. Дереворежущий инструмент с саморегулирующимися зубьями, установленными на опоре скольжения / А. А. Гришкевич, С. С. Макаревич // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревооб- раб. пром-сть. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 255–261.

3. Хан, Х. Теория упругости. Основы линейной теории и ее применения / Х. Хан; пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 344 с.

4. Рекач, В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости / В. Г. Рекач. – М.: Высш. шк., 1977. – 216 с.

Поступила 14.03.2011