

НАПРЯЖЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ

Ключевые слова: профильное фрезерование, древесина, заготовка, режущий инструмент, обработанная поверхность, глубина резания, скорость подачи, скорость резания.

Установлены аналитические зависимости, сил резания-трения в зоне контакта режущего клина с обрабатываемым материалом заготовки, а также инерционные силы, действующие на стружку, сходящую по передней поверхности режущей пластины. Учтена геометрия режущей части инструмента, элементы режима профильного фрезерования и конструктивные параметры фасонной фрезы. Экспериментально определены площади контакта режущего клина с обрабатываемой древесиной по передней и задней поверхностям, что позволяет рассчитать усредненные напряжения, действующие в зоне резания.

Keywords: profile milling, wood, slab, cutting tool, processed surface, cutting depth, giving speed, cutting speed.

Analytical dependences, of cutting-friction forces in a contact zone of a cutting wedge with a slab material, and also the inertial forces operating on a shaving, descending on a forward surface of a cutting plate are established. The geometry of a tool cutting part, of a profile milling cutting mode elements and a shaped mill constructive parameters are considered. The contact areas of a cutting wedge with processed wood on forward and back surfaces that allows to calculate the average pressure in a cutting zone are experimentally defined.

Введение

Энергетические показатели процессов механической обработки различных деталей влияют не только на их технологическую себестоимость, но и на процесс формирования окончательных размеров. Так, располагая значением главной составляющей P_z силы резания можно определить мощность резания, а с учетом известного машинного времени рассчитать количество потребленной электрической энергии для выполнения той или иной технологической операции.

Количество потребленной электроэнергии непосредственно учитывается при расчете себестоимости процесса обработки детали.

Кроме этого, численное значение главной составляющей P_z используется при исследовании крутильных колебаний режущего инструмента, закрепленного на быстровращающемся шпинделе.

Радиальная составляющая P_y направлена перпендикулярно обработанной поверхности, поэтому она оказывает прямое влияние на упругие смещения режущего инструмента относительно обработанной поверхности, которые определяют геометрическую точность готового изделия. Составляющие P_y и P_x влияют на значение силы трения, износ и стойкость режущего инструмента, на колебания элементов системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка».

Механические напряжения, возникающие в зоне контакта режущего клина с обрабатываемым материалом заготовки, также зависят от изменения значений составляющих силы резания. Нормальные и касательные напряжения, действующие по передней, задней поверхностям режущего инструмента определяют не только механическую прочность, но и характер износа режущего инструмента. Износ в свою очередь влияет непосредственно на размерную точность получаемых размеров.

Таким образом, силы P_y и P_x являются доминирующими факторами любого процесса механической обработки различных материалов, а знание границ изменения их численных значений необходимы для качественного проектирования нового технологического оборудования и процесса резания.

Определение главной составляющей P_z силы резания

Главная составляющая силы резания при фрезеровании определяется эмпирической зависимостью [1, с. 444]:

$$P_z = \frac{C_p^{x_p} v_p^{y_p} B^{z_p} n^{u_p}}{D^{q_p} \pi^{w_p}} K_p, \quad (1)$$

где C_p , x_p , y_p , u_p , q_p , w_p – коэффициент и показатели степени при глубине резания t , скорости подачи v_p , ширине фрезерования B , диаметре D и частоте вращения n фрезы соответственно; z – число зубьев фрезы; K_p – поправочный коэффициент.

Эмпирическая формула (1) свидетельствует о влиянии диаметра фрезы на главную составляющую P_z силы резания (член D^{q_p} стоит в знаменателе). Введем обозначение

$$E = \frac{C_p^{x_p} v_p^{y_p} B^{z_p} n^{u_p}}{\pi^{w_p}}. \quad (2)$$

Тогда
$$P_z = \frac{E}{D^{q_p}} \quad (3)$$

Для конкретного режима фрезерования E является постоянной величиной. При профильном фрезеровании значение текущего радиуса R_t фасонной фрезы, используемой для обработки

отходов лесопиления, изменяется вдоль профиля фрезы в соответствии с выражением [2]:

$$x_t = R_{\text{рк}}(1 - \cos(\arcsin(\frac{z_t}{R_{\text{рк}}})) + R_{\text{мин}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{рк}}$ – радиус режущего профиля фрезы; z_t – аппликата, определяющая расстояние рассматриваемой поперечной плоскости фрезы от ее геометрического центра; $R_{\text{мин}}$ – минимальный радиус фрезы, который расположен в поперечной плоскости симметрии фрезы.

Подставив в (3) значение текущего диаметра фасонной фрезы $2R_t$, используемой для обработки отходов лесопиления, получим

$$P_x = \frac{E}{(2R_{\text{рк}}(1 - \cos(\arcsin(\frac{z_t}{R_{\text{рк}}})) + R_{\text{мин}})^{q_p}}, \quad (4)$$

где $q_p = 0,86 \leq 1$ – показатель степени для фасонного фрезерования [1, с. 444].

Из (4) следует, что при фасонном фрезеровании изменение аппликаты z_t приводит к изменению единичной главной составляющей силы резания P_x вдоль профиля фрезы, поэтому необходимо установить закономерность ее изменения.

При $z_t = 0$ текущее поперечное сечение располагается в центре фрезы, а при $z_t = \pm B/2$ (B – высота фрезы) поперечные сечения совпадают с каждым из торцов инструмента. При $z_t = 0 \dots 1$ мм и реальном значении радиуса $R_{\text{рк}} = 60 \dots 100$ мм косинус в уравнении (4) примерно равен единице, следовательно, единичная сила

$$P_x \approx \frac{E}{R_{\text{рк}}^{q_p}}. \quad (5)$$

При $z_t = (+\frac{B}{2} - 1)$ мм

$$P_x \approx \frac{E}{(2R_{\text{рк}}(1 - \cos(\arcsin(\frac{B}{2R_{\text{рк}}})) + R_{\text{мин}})^{q_p}}, \quad (6)$$

а при $z_t = (-\frac{B}{2} + 1)$ мм

$$P_x \approx \frac{E}{(2R_{\text{рк}}(1 - \cos(\arcsin(\frac{B}{2R_{\text{рк}}})) + R_{\text{мин}})^{q_p}}, \quad (7)$$

но, поскольку косинус является четной функцией, то выражения (6) и (7) равносильны, поэтому в плоскости каждого торца фрезы единичная сила резания принимает одинаковое минимальное значение.

Таким образом, сила резания в окрестности поперечной плоскости симметрии фасонной фрезы всегда больше, чем в плоскостях каждого торца при вогнутом профиле режущего инструмента.

При выпуклом профиле фасонной фрезы картина изменяется: единичная сила резания в окрестности поперечного сечения фрезы меньше, чем в окрестности каждого торца.

Для процесса профильного фрезерования отходов лесопиления фрезой с вогнутым профилем наибольшая сила резания возникает в окрестности поперечной плоскости симметрии

фасонной фрезы при $B/2$.

По мере смещения поперечного сечения фрезы вправо и влево от геометрического центра фрезы единичная сила резания уменьшается по кривой второго порядка.

Чем выше режим фрезерования, тем больше разность значений сравниваемой единичной силы резания. Аналогично изменяются не только единичная главная, но и радиальная составляющая силы резания.

По передней поверхности 1-2 режущего клина (рис. 1) сходит стружка, увлекаемая во вращение по стрелке D_r режущей пластиной фрезы. Протяженность контакта стружки с клином равна l_1 , при этом возникают нормальные напряжения, эпюра которых имеет вид треугольника [3, с. 71].

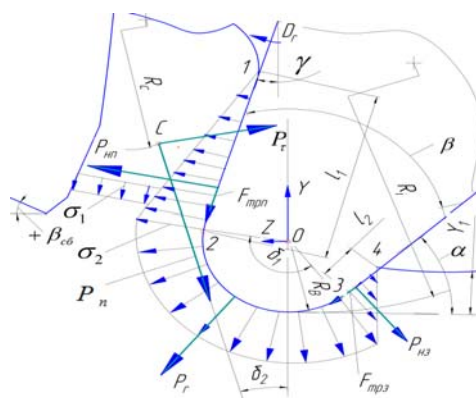


Рис. 1 – Силы и напряжения, действующие в зоне режущего клина, при снятии слоя древесины

На стружку действуют центростремительное a_n и тангенциальное a_t ускорения, вызывающие инерционные силы $F_n = ma_n$, $F_t = ma_t$, приложенные в центре масс C стружки.

Инерционная центробежная сила P_n вызывает в поперечном сечении стружки нормальные напряжения σ_1 сжатия, а тангенциальная сила P_t прижимает стружку к передней поверхности режущего клина, увеличивая трение между сходящей стружкой и клином.

Контур режущего лезвия 2-3 очерчен при вершине по дуге окружности радиусом R_2 и, воздействуя на заготовку, создает в обрабатываемом материале нормальные напряжения σ_2 . Задняя поверхность 3-4 режущего клина действует на обработанную поверхность, вследствие упругого восстановления древесины на величину Y_1 , при этом возникают напряжения, изменяющиеся по закону треугольника от нуля до σ_2 .

Вдоль профиля фасонной фрезы значения нормальных напряжений изменяются вследствие переменного радиуса фрезы, сбежистости заготовки и случайного появления в зоне резания сучков. Угол $\beta_{св}$ отражает положительное приращение припуска, вызванное сбежистостью заготовки.

Эпюра напряжений включает в себя центральную часть, возникающую при фрезеровании сучка, и участки 3–5, характерные для фрезерования стволовой древесины.

Вследствие сбежистости заготовки происходит увеличение припуска, что вызывает возрастание нормальных напряжений по всему профилю фрезы и контуру режущего лезвия. Максимальные нормальные напряжения возникают в поперечной плоскости симметрии фасонной фрезы.

При фрезеровании круглого сучка нормальные напряжения на передней поверхности режущей пластины сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Эпюра напряжений представляется в виде криволинейного четырехугольника.

Нормальная сосредоточенная сила $P_{\text{нп}}$ отражает действие передней поверхности режущего клина на сходящую стружку, при движении которой возникает сила трения $F_{\text{трп}}$. Со стороны задней поверхности режущего клина действует нормальная сила $P_{\text{нз}}$ и сила трения $F_{\text{трз}}$.

Сосредоточенная сила P_r отражает действие радиусного контура режущего клина на обрабатываемый материал. Центральный угол δ_1 определяет протяженность радиусного контура лезвия.

Современная механическая обработка древесины проводится при высоких скоростях резания, а процесс снятия элементарной стружки за единичный рез занимает десятитысячные доли секунды.

Снимаемый материал из состояния покоя (скорость подачи заготовки не учитываем из-за ее малости по сравнению со скоростью резания) разгоняется до скорости резания, и на стружку действуют значительные по величине ускорения (несколько тысяч м/с^2). В таких условиях возникает значительная по величине инерционная центробежная сила, приложенная в центре масс С стружки.

Оценим численное значение этой центробежной силы. для реального процесса фрезерования: глубина резания $t=20$ мм, скорость резания $v=50$ м/с, скорость рабочей подачи заготовки 30 м/мин, радиус $R_i=65$ мм, высота $B=100$ мм, радиус профиля фрезы $R_{\text{рк}}=62,5$ мм.

Угол выхода $(s_1 + s_2) = \arccos(1 - \frac{t}{R}) = \arccos(1 - \frac{20}{65}) = 46,2^\circ$. Длина единичного реза $l_p = R_i(s_1 + s_2) = 65 \cdot \frac{46,2}{57,3} = 52,4$ мм, подача на зуб фрезы $S_z = 1,54$ мм/зуб,

$2R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right) = 2 \cdot 62,5 \arcsin\left(\frac{100}{2 \cdot 62,5}\right) = 109,7$ мм. Масса стружки $m = V_1 = 2 \rho_c F_{\text{ср}} R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right) = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,154 \cdot (2 - 0,0007) \cdot 6,25 \arcsin\left(\frac{10}{2 \cdot 6,25}\right) = 2,5$ г (ρ_c — плотность древесины, $F_{\text{ср}}$ — средняя площадь срезаемого слоя).

Центробежная сила $P_n = m\omega^2 R_c = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{50}{0,065}\right)^2 \cdot (65 - 26,2) \cdot 10^{-3} = 57,4$ Н. Несмотря на незначительную массу

стружки (единицы граммов), возникает инерционная центробежная сила P_n , сравнимая с силой резания.

Поэтому при столь высоких скоростях фрезерования центробежной силой инерции, действующей на стружку, пренебрегать нельзя. Следует отметить, что в литературных источниках процессы фрезерования древесины рассмотрены для сравнительно малых скоростей резания (20...30 м/с), а инерционные силы, возникающие в процессе обработки, не учитывались.

Спроектируем на оси координат Z и Y силы, действующие в зоне резания, в результате получим выражения для главной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания:

$$P_z = F_{\text{трп}} \sin \gamma - P_n \cos \delta_2 + P_{\text{нп}} \cos \gamma - F_{\text{тр}} \sin \delta_2 + P_r \cos(0,5\delta_1 - \gamma) - P_{\text{нз}} \sin \alpha + F_{\text{трз}} \cos \alpha, \quad (8)$$

$$P_y = -F_{\text{трп}} \cos \gamma - P_n \sin \delta_2 + P_{\text{нп}} \sin \gamma + F_{\text{тр}} \cos \delta_2 + P_r \sin(0,5\delta_1 - \gamma) - P_{\text{нз}} \cos \alpha + F_{\text{трз}} \sin \alpha, \quad (9)$$

где γ — передний угол, α — задний угол, $\delta_1 = \pi - (\gamma + \beta)$ — угол между перпендикулярами, проведенными из начала системы координат XOY к передней и задней плоскостям режущего клина; δ_2 — угол между осью Y и инерционной центробежной силой P_n .

В правые части уравнений (8) и (9) входят силы, которые можно выразить через напряжения, возникающие в зоне резания:

$$\begin{aligned} P_{\text{нз}} &= \sigma_2 l_1 R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right), \\ F_{\text{трп}} &= \sigma_2 l_1 f_{\text{п}} R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right), P_n = m\omega^2 \left(R_i - \frac{l_1}{2}\right), \\ P_r &= 2\sigma_2 R_E (\pi - (\gamma + \beta)), \\ P_{\text{нп}} &= \sigma_2 l_2 R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right), \\ F_{\text{трз}} &= \sigma_2 l_2 f_{\text{п}} R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим в (8) значения сосредоточенных сил, представленных выражениями (10), в результате получим:

$$\begin{aligned} P_z &= \left(\sigma_2 l_1 R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right) (\cos \gamma + f_{\text{п}} \sin \gamma) - m\omega^2 \left(R_i - \frac{l_1}{2}\right) \right) \cos \delta_2 + \\ &+ 2\sigma_2 R_E (\pi - (\gamma + \beta)) R_{\text{рк}} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{\text{рк}}}\right) \cos(0,5\delta_1 - \gamma) - \end{aligned}$$

$$-\sigma_2 l_2 R_{PK} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{PK}}\right) \sin \alpha + \\ + \sigma_2 l_2 f_n R_{PK} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{PK}}\right) \cos \alpha, \quad (11)$$

Из (11) выразим нормальные напряжения

$$\sigma_2 = \frac{F_2 - m\omega^2 \left(R_1 - \frac{l_1}{2}\right) \cos \delta_1}{a_1 + a_2 \cos(\alpha + \delta_1 - \gamma) - l_2 B_K \sin \alpha + l_2 B_K f_n}, \quad (12)$$

где

$$a_1 = l_1 B_K (\cos \gamma + f_n \sin \gamma); \\ a_2 = 2R_E B_K (\pi - (\gamma + \beta));$$

l_1, l_2 — соответственно ширина контакта стружки с передней поверхностью и обработанной древесины с задней поверхностью режущего клина; m — масса сходящей по клину стружки; ω — угловая скорость; R_i — текущий радиус фрезы;

$B_K = 2R_{PK} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{PK}}\right)$ — длина профиля фрезы; f_n — коэффициент трения древесины о металл; R_E — радиус при вершине лезвия; δ_1 — угол между перпендикулярами к передней и задней поверхностям; α, γ, β — соответственно задний, передний угол и угол заострения режущего клина.

Определить напряжения σ_2 по (12) можно при известных составляющих силах резания, ширине контакта l_1, l_2 , площадях контакта по передней и задней поверхностям режущих пластин.

Главная составляющая F_2 силы резания определяется на основе известной мощности резания или по степенным зависимостям, приведенным в справочной литературе.

Усредненные напряжения σ_2 определяются делением сил, действующих в зоне резания, на площадь контакта режущего клина с обрабатываемой заготовкой.

Ввиду сложности и значительных погрешностей теоретического описания механизма формирования площади контакта в зоне резания, фактическую площадь контакта режущего клина с материалом обрабатываемой заготовки определяли экспериментально.

Эксперимент позволяет учесть все действующие в зоне резания силы, а также другие независимые факторы процесса и физико-механические свойства обрабатываемой древесины.

На переднюю, заднюю поверхности, радиусный участок режущей профильной пластины нанесли голубую краску, после ее высыхания проводили профильное фрезерование отходов лесопиления на заданном режиме.

В процессе резания краска в местах контакта стиралась и появлялись светлые блестящие металлические ленточки (рис. 2).

Размеры ленточек измеряли на инструментальном микроскопе, затем в программной среде Pro Engineer определяли численные значения фактических площадей контакта.



Рис. 2 — Серпообразная площадь контакта передней поверхности режущей пластины фасонной фрезы с заготовкой после обработки

После профильного фрезерования отходов лесопиления (скорость резания 45 м/с, глубина резания 8 мм, скорость рабочей подачи 12 м/мин, минимальный радиус 80 мм, максимальный радиус 90 мм, высота 100 мм, радиус профиля 106,25 мм, высота профильной части фрезы 95 мм) площадь контакта по передней поверхности составила 87,4 мм², а по задней поверхности — 70,4 мм². При этом нормальные напряжения, усредненные по всей площади контакта инструмента и заготовки, составили 1,47 Н/мм².

В поперечной плоскости симметрии фасонной фрезы ширина площадки контакта больше, чем в плоскости каждого из торцев как на передней, так и задней поверхности. Ширина площадки по передней поверхности составила 1,1 мм, и она больше, чем по задней поверхности — 0,9 мм. В плоскостях торцев фрезы ширина полосы составила 0,6 и 0,58 мм для передней поверхности, и 0,45; 0,46 мм — для задней, что свидетельствует о превышении площади контакта по передней поверхности на 19,5%.

Площадь контакта по задней поверхности определяется упругим восстановлением древесины, вышедшей из зоны резания. На основании этих данных можно довольно точно определить жесткость процесса резания, что очень важно для описания не только протекающих физико-механических явлений, но и геометрической точности обработанных поверхностей.

Проведенные эксперименты подтвердили теоретическое положение о том, что в окрестности поперечной плоскости фасонной фрезы возникает большая сила резания, чем в окрестности из торцев инструмента. Об этом свидетельствует большая площадь контакта по передней и задней поверхностям в окрестности поперечной плоскости симметрии фрезы.

Литература

1. Справочник технолога — машиностроителя. В 2-х томах. Т. 2. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.
2. Фомин, А. А. Кинематика формирования обрабатываемой поверхности в процессе фрезерования / А. А. Фомин // СТН, 2013. — №4 — С. 16 — 19.
3. Любченко, В. И. Резание древесины и древесных материалов: учебник для вузов. 3-е изд. / В. И. Любченко. — М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2004. — 310 с.

4. Фомин А.А., Гусев В.Г., Сафин Р.Г. Математическая модель срезаемого слоя при профильном фрезеровании древесных заготовок, не имеющих сбежистости. Вестник Казанского технологического университета. – 2013 г. - №14 - С. 183-188.
5. Фомин А.А., Гусев В.Г., Сафин Р.Г. Мощность резания при профильном фрезеровании отходов лесопиления. Вестник Казанского технологического университета. – 2013 г. - №14 - С. 193-198.

© **А. А. Фомин** - канд. техн. наук, доц. каф. технологии машиностроения Владимирского госуд. ун-та им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, prof_gusev@mail.ru.