

УДК 674.023

А. А. Фомин, Р. Г. Сафин, В. Г. Гусев

ПРОТЯЖЕННОСТЬ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА С ЗАГОТОВКОЙ И УГЛЫ ВСТРЕЧИ С ВОЛОКНАМИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ

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

Определена протяженность контакта фасонной фрезы с древесной заготовкой, имеющей неоднородные физико-механические свойства, на основании этого возможен расчет силы резания при профильном фрезеровании крупных отходов лесопиления. Определены углы встречи вектора скорости резания с направлением волокон древесины, что позволяет выбрать поправочный коэффициент на удельную работу резания.

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

Contact length of a shaped mill with the wood slab having non-homogeneous physic-mechanical properties is defined on the basis of it calculation of cutting force at profile milling of a large wood waste is allowed. Meeting Corners of a cutting speed vector with a wood fibres direction are defined that allows to choose correction coefficient on specific cutting force and cutting work.

Введение

На лесопромышленных предприятиях Российской Федерации формируются значительные объемы крупных отходов древесины (далее отходов лесопиления), которые используются не по своему прямому назначению. Ежегодно на лесоперерабатывающих предприятиях страны образуются миллионы кубических метров периферийных сегментов, горбыля, реек и др. древесных отходов, из которых производят топливные гранулы и технологическую щепу.

Однако, отходы лесопиления состоят из наиболее качественных периферийных волокон древесины, из которых целесообразно производить не топливо и щепу, а изделия прямого назначения: элементы мебели, изделия для внутренней отделки помещений, строительства современных домов и пр. Механическая обработка отходов лесопиления и выпуск на этой основе качественной древесной продукции позволит уменьшить нерациональное использование древесины, сэкономить материальные и энергетические ресурсы, стабилизировать и улучшить экологическую ситуацию путем частичного сохранения природных лесных массивов как основы регенерации кислорода воздуха.

Вместе с этим отходы лесопиления характеризуются непредсказуемой формой и размерами, неоднородностью свойств обрабатываемого материала, стохастическим расположением сучков и отсутствием развитых технологических баз, что вызывает серьезные трудности при их механической обработке и в определенной степени объясняет причину отсутствия высокоэффективных технологических процессов по глубокой переработке леса.

В условиях указанной нестабильности обеспечение высокой производительности механической обработки, получение точной готовой продукции из

отходов лесопиления проблематично. Вследствие этого существует необходимость в научном обосновании разработки высокоэффективных процессов и оборудования для механической обработки отходов лесопиления. Качественное проектирование таких процессов и оборудования требует научной информации о мощности и силе резания, которые могут быть определены на основании известной длины контактного взаимодействия инструмента и заготовки, а также известных углов встречи вектора скорости резания с направлением волокон древесины.

Обработка поверхностей отходов лесопиления характеризуется фрезерованием вдоль волокон, однако, фрагментарно встречаются сучки со значительно более высокой твердостью материала и изменением направления волокон относительно вектора скорости резания. Максимальный коэффициент использования материала обеспечивается при механической обработке неокоренной поверхности отходов лесопиления по кривой второго порядка.

Наиболее просто проводить контурную обработку по окружности, в этой связи режущий профиль фасонной фрезы очерчиваем по дуге окружности радиусом $R_{\text{фк}}$, совпадающим с радиусом обработанной поверхности готового изделия.

Определение протяженности контакта инструмента с сучком древесной заготовки

Для достоверной оценки силовых параметров процесса профильного фрезерования отходов лесопиления определим протяженность контакта фасонного режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой. Встречающиеся в зоне резания сучки имеют диаметры, которые всегда меньше длины режущего профиля. В этой связи создается ситуация, при которой сила резания вдоль профиля фрезы становится

переменной величиной. На участках режущего профиля фрезы, где происходит обработка сучка, сила резания существенно возрастает, а на участках такой же протяженности, где сучки отсутствуют и обрабатывается чистая стволовая древесина, сила резания значительно меньше.

Режущий профиль 1 фасонной фрезы, очерченный по дуге окружности с центром в точке O_1 и радиусом R_{PK} , вступает в контакт с сучком 2 в точке О (рис. 1).

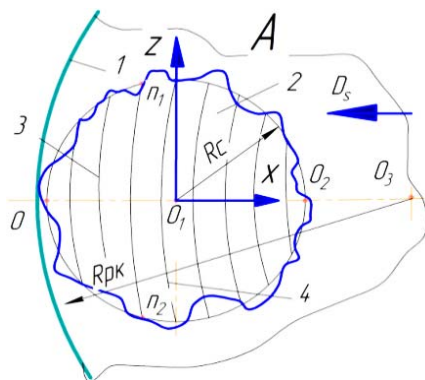


Рис. 1 - Изменение протяженности контакта профиля фрезы с сучком

По мере движения заготовки по стрелке D_s со скоростью рабочей подачи режущий профиль оставляет следы резов в виде текущего положения 3 профиля. Положение $n_1 - n_2$ приближается к центру O_1 , а в положении 4 режущий профиль проходит через крайние точки диаметра $2R_c$ сучка (R_c – радиус окружности сучка) и характеризуется максимальной протяженностью линии контакта инструмента с сучком. Дальнейшее перемещение заготовки приводит к постепенному уменьшению протяженности линии контакта фрезы с сучком вплоть до точки O_2 , в которой длина контакта равна нулю.

Сучок 2 окружен стволовой древесиной, твердость и прочность которой существенно ниже, чем у сучка, поэтому единичная сила резания при обработке сучка больше, чем при обработке стволовой древесины. По мере движения заготовки от точки O_1 к точке О протяженность контакта режущего инструмента и сучка, а, следовательно, и сила резания возрастают, а затем она уменьшается в обратной последовательности до нуля в точке O_2 .

Максимальная силовая нагрузка возникает одновременно в момент контакта режущего профиля фрезы с сучком по наибольшей протяженности, а минимальная – при фрезеровании чистой стволовой древесины. Протяженность линии контакта $n_1 n_2$ профиля 1 фрезы с сучком 2

$$n_1 n_2 = 2R_{PK} \arcsin \left(\frac{z_{ci}}{R_{PK}} \right), \quad (1)$$

где R_{PK} – радиус профиля фрезы; z_{ci} – аппликата точек пересечения профиля фрезы с контуром обрабатываемого сучка.

Центральный угол, соответствующий текущей дуге окружности $n_1 n_2$,

$$\alpha_{ci} = 2 \arcsin \left(\frac{z_{ci}}{R_{PK}} \right), \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) неизвестной является величина z_{ci} , для определения которой решим совместно систему, состоящую из двух уравнений. Первое уравнение описывает окружность, по которой очерчен сучок, а второе – окружность, которая описывает режущий профиль фрезы:

$$\begin{cases} x_c^2 + z_c^2 = R_c^2, \\ (x_c - (R_{PK} - R_c + v_z \tau))^2 + z_c^2 = R_{PK}^2, \end{cases} \quad (3)$$

где R_c – радиус окружности сучка; v_z – скорость рабочей подачи заготовки; τ – текущее время фрезерования; R_{PK} – радиус профиля фрезы.

Вычитая из первого уравнения второе и выполнив преобразования, получим

$$x_c = \frac{R_{PK}^2 - R_c^2 - (R_{PK} - R_c + v_z \tau)^2}{2(R_{PK} - R_c + v_z \tau)}, \quad (4)$$

$$z_c = \pm \sqrt{R_c^2 - x_c^2} =$$

$$= \pm \sqrt{R_c^2 - \left[\frac{R_{PK}^2 - R_c^2 - (R_{PK} - R_c + v_z \tau)^2}{2(R_{PK} - R_c + v_z \tau)} \right]^2}. \quad (5)$$

По выражениям (4) и (5) вычисляются координаты x_c и z_c точек пересечения окружностей радиусом R_c и R_{PK} при угле выхода $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, равном $0,5\pi$. Координаты x_{ci} и z_{ci} для произвольного угла выхода при профильном фрезеровании сбежистой заготовки

$$x_{ci} = \frac{z_{\alpha i}}{\pi} \cdot \frac{(R_{PK}^2 - R_c^2 - (R_{PK} - R_c + v_z \tau)^2)}{2(R_{PK} - R_c + v_z \tau)}, \quad (6)$$

$$z_{ci} = \frac{z_{\alpha i}}{\pi} \pm \sqrt{R_c^2 - \left[\frac{R_{PK}^2 - R_c^2 - (R_{PK} - R_c + v_z \tau)^2}{2(R_{PK} - R_c + v_z \tau)} \right]^2} \pm 0,01 v_z \tau, \quad (7)$$

где $z_{\alpha i}$ – текущее значение угла выхода зуба режущего инструмента из древесины.

Последний член выражения (7) со знаком плюс-минус влияет на изменение координаты z_{ci} вследствие среднего статистического значения сбежистости заготовки, лимитированного ГОСТ. По формулам (2) и (7) при заданных размерах фасонной фрезы, сучка, текущем угле выхода и скорости рабочей подачи периферийного сегмента можно определить протяженность контакта сбежистой заготовки с сучками различных диаметров и высот над неокоренной поверхностью отходов лесопиления.

Протяженность $l_{счз}$ контакта режущего профиля фрезы на участках обработки стволовой древесины (древесины без сучков) определяется путем вычитания из общей протяженности контакта профиля фрезы с заготовкой протяженности $n_1 n_2$, определяемой по (1), то есть

$$l_{\text{рез}} = 2R_{\text{фк}} \left(\arcsin \left(\frac{B}{2R_{\text{фк}}} \right) - \arcsin \left(\frac{q_1}{R_{\text{фк}}} \right) \right). \quad (8)$$

Зная физико-механические характеристики стволовой древесины и сучка, которые приведены в литературных источниках [1, 2], можно вычислить при заданном режиме фрезерования силу резания, действующую на режущий профиль фрезы практически для любого периферийного сегмента, будь он весь из чистой стволовой древесины или представляет собой сочетание последней с мутовками сучков.

При профильном фрезеровании неокоренной поверхности периферийного сегмента 1 возникают силы резания P_1, P_2 , вызванные обработкой сучков 3, 4 (рис. 1, б), а силы P_3, P_4 и P_5 – обработкой оставшейся части поверхностного слоя чистой древесины.

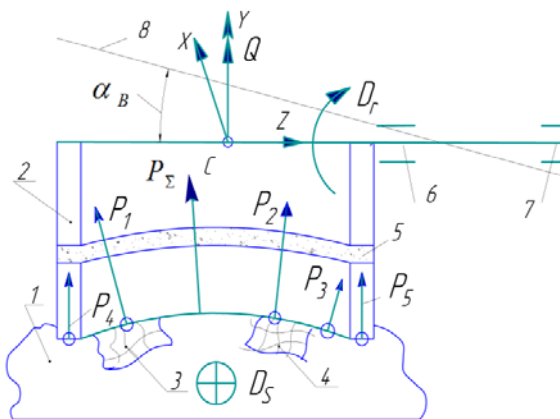


Рис. 2 - Схема сил, действующих на фасонную фрезу при фрезеровании отходов лесопиления, содержащих сучки

Под действием этих сил ось шпинделя с фрезой поворачивается на угол α_v в вертикальной плоскости, левый торец, наиболее удаленный от передней опоры 6, упруго деформируется на величину y_n , а правый торец – на величину y_n . Силы P_1 и P_2 , возникающие при обработке сучков 3 и 4, соответственно, равны:

$$P_1 = R_{\text{фк}} \varphi_1 q_1; \quad (9)$$

$$P_2 = R_{\text{фк}} \varphi_2 q_2. \quad (10)$$

где $R_{\text{фк}}$ – радиус профиля фрезы; φ_1, φ_2 – центральный угол, соответствующий протяженности сучка 3 и 4 (рис. 3).

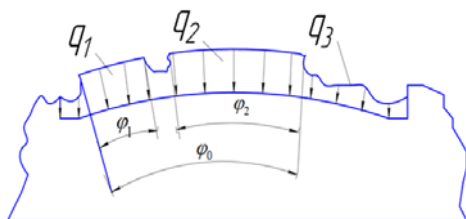


Рис. 3 - Равномерно распределенная нагрузка в поперечном сечении заготовки, обусловленная действием силы резания

Между сучками 3 и 4, а также справа и слева от них расположены участки чистой стволовой древесины, при обработке которых возникает сила

$$P_3 = R_{\text{фк}} (\varphi_3 - \varphi_1 - \varphi_2) q_3 + R_{\text{фк}} (\varphi_4 - \varphi_5), \quad (11)$$

где φ_3 – центральный угол, соответствующий дуге окружности режущего профиля фрезы.

Сила

$$P_4 = P_5 = 0,5(B - 2R_{\text{фк}} \ln(0,5\varphi_1)). \quad (12)$$

Равнодействующую P_x сил $P_1 - P_2$ находим путем векторного построения многоугольника сил. Зная равнодействующую силу P_x , можно определить не только мощность резания, но и упругие деформации элементов технологической системы, а, следовательно, геометрическую точность обработанных поверхностей.

Важнейшей характеристикой процесса фрезерования древесины является угол встречи с волокнами, который равен углу между направлением скорости результирующего движения резания и направлением волокон древесины в контуре заготовки [2, с. 23; 3, с. 19;]. Угол встречи φ_v при фрезеровании вычисляется как сумма углов подачи $\varphi_{\text{пл}}$ (между направлением волокон в заготовке и вектором скорости подачи v_s) и среднего угла $\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_{\text{вх}}/2 \approx \varepsilon_{\text{вых}}/2$ [1, с. 119]. Углы встречи при фрезеровании отходов древесины зависят от углов врасстания сучков, породы древесины и других факторов. Углы встречи необходимо знать для определения удельной работы фрезерования, значение которой используют для расчета мощности резания.

У ели наиболее часто встречаются углы врасстания около 96° , т. е. сучки направлены в основном вниз, а для сосны 86° . Для осины средний угол врасстания 50° , для березы – 30° [4, с. 241]. Ввиду этого волокна сучков располагаются к вектору скорости резания v_s под различными углами. Отмеченные факты принципиально изменяют условия резания сбежистой заготовки с сучками [5] по сравнению с фрезерованием древесины, рассмотренным в работах [1 – 3 и др.].

Волокна периферийного сегмента направлены вдоль заготовки, что создает благоприятные условия для снятия материала, поскольку углы между скоростью резания и волокнами ствольной древесины изменяются в сравнительно небольших пределах (от 0 до $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$). Углы встречи при фрезеровании сучков изменяются не только в зависимости от породы древесины, но и от того, каким концом (комлевым или вершинным) заготовка направляется в зону фрезерования.

При фасонном фрезеровании сучков и направлении заготовки в зону резания вершинным концом, углы встречи равны: для сосны $\varphi_{\text{вх}} = \varphi_{\text{пл}} - 0,5\varepsilon_{\text{ср}} = 1,54 - 0,5 \arccos(1 - \frac{\varepsilon}{R_1})$; для ели $\varphi_{\text{вх}} = 1,47 + 0,5 \arccos(1 - \frac{\varepsilon}{R_1})$; для осины $\varphi_{\text{вх}} = 2,27 - 0,5 \arccos(1 - \frac{\varepsilon}{R_1})$; для березы $\varphi_{\text{вх}} = 2,62 - 0,5 \arccos(1 - \frac{\varepsilon}{R_1})$. На основании этих зна-

чений углов встречи устанавливаем, что при направлении заготовки в зону резания вершинным концом фрезерование сосны, осины и березы будет торцово-продольным против волокон, а для ели – торцово-продольным по волокнам.

При направлении заготовки в зону резания комлевым концом углы встречи равны: для сосны $\varphi_{21} = \varphi_{21} - 0,5\alpha_{\text{сч}} = 1,5 - 0,5\arccos(1 - \frac{r}{R_i})$; для ели $\varphi_{21} = 1,68 + 0,5\arccos(1 - \frac{r}{R_i})$; для осины $\varphi_{21} = 0,87 - 0,5\arccos(1 - \frac{r}{R_i})$; для березы $\varphi_{21} = 0,52 - 0,5\arccos(1 - \frac{r}{R_i})$. На основании этих данных устанавливаем, что при направлении сосны, осины и березы в зону резания комлевым концом фрезерование будет торцово-продольным против волокон, а для ели – торцово-продольным по волокнам.

Условия резания существенно изменяются в зависимости от диаметра и высоты сучков, появляющихся в зоне резания, а также сбежистости заготовки, вызывающей положительное или отрицательное приращение глубины резания. Эти обстоятельства являются причиной перехода от продольного к продольно-торцовому фрезерованию. В точках 1 и 3 направления векторов v_1 и v_2 скоростей резания на минимальном $R_{\min}$ и максимальном $R_{\max}$ радиусах фрезы совпадают (рис. 4).

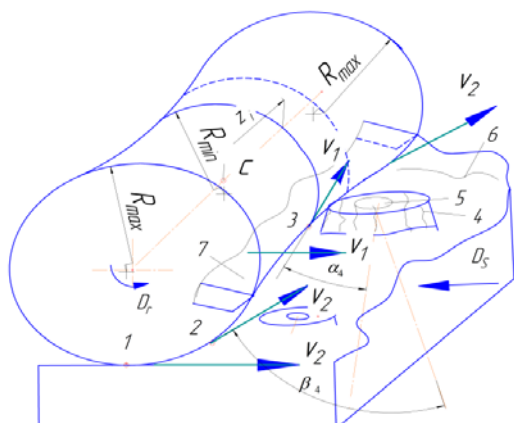


Рис. 4 - Углы между векторами скоростей резания, волокнами заготовки и сучка

В начале процесса резания сучков угол встречи векторов v_1 и v_2 с волокнами 4 не зависит от значения переменного радиуса фрезы. Для точки 1 угол встречи зависит от того, каким концом входит заготовка в зону резания. По мере движения режущего клина по дуге контакта от точки 1 к точке 2 происходит уменьшение угла между векторами v_1 , v_2 и во-

локнами сучков. Чем больше диаметр фрезы, тем меньше скорость изменения угла встречи.

В точке 3 вектор v_1 направлен касательно к окружности радиусом $R_{\min}$, под углом $0,5\alpha_{\text{сч}}^{\text{мн}}$, а вектор v_2 в точке 2 – касательно к окружности радиусом $R_{\max}$ под углом $0,5\alpha_{\text{сч}}^{\text{макс}}$. При входе заготовки в зону резания комлевым концом текущий угол между вектором v_1 и волокнами 4 сучка 5 равен α_4 .

Поскольку стандартом допускается превышение сучка над поверхностью заготовки не более 2 мм, то в процессе фрезерования фактическая глубина резания увеличивается, а, следовательно, увеличивается и угол контакта инструмента с заготовкой. Поэтому глубину резания следует увеличить на значение превышения высоты сучка над неокоренной поверхностью заготовки.

При входе заготовки из сосны в зону резания вершинным концом текущее значение угла между вектором v_1 и волокнами 4 сучка 5 составляет β_4 .

Анализ углов между векторами скоростей резания и волокнами показал, что для профильного фрезерования сбежистой заготовки с сучками характерно переходное резание от продольного к торцово-продольному по волокнам и торцово-продольному против волокон. При этом вектор скорости главного движения и плоскость резания составляют с направлением волокон сучков угол от нуля до 90° .

Таким образом, углы встречи, определение которых рассмотрено выше, необходимы для выбора поправочного коэффициента на удельную работу резания.

Литература

1. Амалицкий, В. В. Деревообрабатывающие станки и инструменты: учебник / В. В. Амалицкий, В. В. Амалицкий. – М.: ИППО, Издательский центр «Академия», 2002. – 400с. – ISBN 5-8222-0173-3
2. Любченко, В. И. Резание древесины и древесных материалов: учебник для вузов. 3-е изд. / В. И. Любченко. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2004. – 310 с.
3. Коротков, В. И. Деревообрабатывающие станки: учебник / В. И. Коротков. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 304 с. - ISBN 5-7695-1073-0.
4. Ширнин, Ю. А. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Ч 1. / Ю. А. Ширнин. – Лесосечные работы: учеб. пособие. – М.: МГУЛ, 2004. – 446 с.
5. 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.
6. 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; Р. Г. Сафин – д-р техн. наук, проф., зав. каф. переработки древесных материалов КНИТУ; В. Г. Гусев – д-р техн. наук, проф. каф. технологии машиностроения Владимирского госуд. ун-та им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, prof_gusev@mail.ru.