УДК 674.023

А. А. Фомин, Р. Г. Сафин, В. Г. Гусев

ВЛИЯНИЕ СБЕЖИСТОСТИ ФРЕЗЕРУЕМОЙ ДРЕВЕСНОЙ ЗАГОТОВКИ НА СТРУКТУРУ ВРЕМЕНИ ЕДИНИЧНОГО ЦИКЛА «РЕЗАНИЕ - ОТДЫХ»

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

Определены структурные составляющие времени единичного цикла «резание – отдых» при фасонном фрезеровании отходов лесопиления и установлено их влияние на изменение главной составляющей силы резания. Приведены значения поправочного коэффициента на профильное фрезерование древесины.

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

Structural components of an individual cycle time «cutting - rest» at shaped milling a wood waste are defined and their influence on change of cutting force main component is established. Values of correction factor on the wood profile milling are resulted.

Введение

Крупные отходы лесопиления образуются в процессе продольного распила бревен, которые характеризуются сбежистостью. Под сбежистостью бревна понимают полуразность диаметров основания (комля) и вершины бревна. После продольного раскроя бревен сбежистость у периферийных сегментов остается, поэтому в процессе фрезерования неокоренной поверхности сегментов за один проход происходит положительное или отрицательное приращение припуска, в зависимости от того, каким концом (комлевым или вершинным) заготовка направляется в зону резания. При направлении заготовки в зону резания вершинным концом, снимаемый припуск будет непрерывно увеличиваться, а комлевым концом – непрерывно уменьшаться с течение времени фрезерования.

Оба варианта направления заготовки в зону резания принципиально отличаются друг от друга силовыми параметрами процесса резания, сложностью коррекции пространственного положения заготовки в начальной стадии фрезерования и др.

В этой связи проанализируем оба варианта с позиции структурных составляющих времени цикла «резание - отдых» и оценим изменение составляющих силы резания, а также уровень вибрации элементов технологической системы.

Время реза одним зубом фрезы (единичного реза) при профильном фрезеровании заготовки, не имеющей сбежистости,

$$\tau_z = \frac{\arccos\left(1-\frac{t_0}{R_i}\right)}{\omega}, \qquad (1)$$

где t_0 –глубина резания, заданная режимом фрезерования; R_i –текущий радиус фасонной фрезы; ω – угловая скорость фрезы.

Время единичного реза при обработке сбежистой заготовки с положительным приращением припуска изменяется с течением времени фрезерования и определяется по формуле:

$$\tau_{сб1}^{+} = \frac{\arccos\left(1-\frac{(t_0+v_s\tau_z tg\beta_{сб})}{R_i}\right)}{\omega}, \qquad (2)$$

где v_s – скорость рабочей подачи заготовки; $\beta_{сб}$ – средний статистический угол наклона обрабатываемой неокоренной поверхности отходов лесопиления к установочной технологической базовой плоскости, образованной в результате продольного распила бревна.

Время единичного реза при обработке сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска

$$\tau_{сб1}^{-} = \frac{\arccos\left(1-\frac{(t_0+v_s\tau_z tg(\pi-\beta_{сб}))}{R_i}\right)}{\omega}. \qquad (3)$$

Увеличение времени второго, третьего, i – го единичного реза, вызванное сбежистостью заготовки с положительным приращением припуска,

$$\tau_{сб2} = 2\tau_{сб1};\ \tau_{сб3} = 3\tau_{сб1};\ \tau_{сбi} = i\cdot\tau_{сб1}, \qquad (4)$$

где i – текущий номер единичного реза.

С течением времени фрезерования число i единичных резов возрастает, причем $\tau_{сб1} < \tau_{сб2} < \cdots < \tau_{сбi}$.

Проф. В. В. Амалицкий [1, с. 113], проф. В. И. Любченко [2, с. 215] и др. рассматривают главную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания в виде линейной функции угла контакта (угла выхода) инструмента и заготовки. При фрезеровании древесной заготовки, не имеющей сбежистости, в конце каждого реза главная составляющая силы резания равна $P_{z\,max}$ (рис. 1, ордината 1), а при последующих единичных резах она не изменяется (износ режущего инструмента не учитываем). Время τ_z единичного реза также представляет собой постоянную величину и определяется по (1).

По оси абсцисс можно откладывать не только текущее время τ, но и угол контакта [90, с. 200] или длину пути, проходимого режущим зубом по дуге контакта.

Для сбежистой заготовки время поворота фрезы на один зуб (время одного цикла «резание – отдых») представляется в виде суммы элементарных составляющих:

$$\tau_z = \tau_\varepsilon + \tau_{сбi} + \tau_{отд}, \qquad (5)$$

где τ_ε, $\tau_{сбi}$, $\tau_{отд}$ – элементарные составляющие времени цикла τ_z, представляющие соответственно: время поворота фрезы на угол выхода, приращение времени единичного реза из-за сбежистости заготовки, время отдыха, обусловленное отсутствием процесса резания в пределах времени τ_z.

Для древесной заготовки, не имеющей сбежистости, время цикла τ_z также можно определять по формуле (5), но при этом следует принять $\tau_{сбi} = 0$. Элементарные составляющие τ_ε и $\tau_{отд}$ при обработке заготовки без сбега припуска являются постоянными величинами, вследствие чего время упругой деформации элементов технологической системы в моменты резания и время отдыха при отсутствии резания также представляют собой постоянные величины. Однако, этого нельзя сказать о процессе профильного фрезерования сбежистой заготовки.

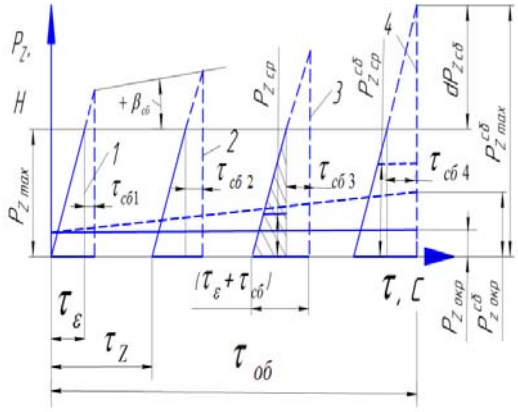

Рис. 1 – Изменение главной составляющей P_Z силы резания и составляющих времени цикла τ_z при фрезеровании сбежистой заготовки с положительным приращением припуска

Из рисунка 1 и выражения (4) следует, что по мере фрезерования сбежистой заготовки с положительным приращением припуска происходит перераспределение элементарных составляющих времени в цикле τ_z.

С возрастанием числа единичных резов, наносимых зубьями фрезы на заготовку, происходит прогрессирующее увеличение времени $\tau_{сбi}$ и уменьшение времени отдыха $\tau_{отд}$. Время цикла τ_z и время единичного реза τ_ε при обработке обычной стволовой древесины, у которой нет сбежистости, представляют собой постоянные величины для заданных условий резания и режущего инструмента. Время $\tau_{сбi}$ в процессе обработки сбежистой заготовки ($+\beta'_{сб}$) непрерывно увеличивается, что приводит к прогрессирующему уменьшению времени отдыха $\tau_{отд}$, а, следовательно, и времени упругого восстановления заготовки при отсутствии резания.

Последнее обстоятельство приводит к снижению уровня вибрации технологической системы, однако увеличение припуска из-за $+\beta'_{сб}$ приводит к возрастанию силы резания и упругих деформаций заготовки под действием этой силы. Поэтому на процессе формообразования заготовки будут сказываться два фактора, вызывающие противоположно направленные друг другу геометрические погрешности, вызванные: прогрессирующим увеличением упругих деформаций заготовки из-за возрастания силы резания и уменьшением уровня вибрации заготовки и фрезы из-за сокращения времени свободных колебаний.

Путь, проходимый режущим клином по дуге контакта при фасонном фрезеровании [4],

$$l_{kt} = R_t(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)_t = v_t \cdot \tau_{\varepsilon t}, \qquad (6)$$

где $v_t = \omega R_t$ – текущая скорость резания, которая при фасонном фрезеровании изменяется вдоль профиля фрезы, $v_t \ni [v_{min}, v_{max}]$ или $v_t \ni [\omega R_{min}, \omega R_{max}]$.

В расчетах используются усредненные по дуге контакта $P_{Z\,ср}$, $P_{y\,ср}$ и усредненные по окружности $P_{Z\,окр}$, $P_{y\,окр}$ составляющие силы резания [90, с. 201]. Главная составляющая силы резания, усредненная по дуге контакта:

$$P_{Z\,ср} = 0{,}5P_{Z\,max}, \qquad (7)$$

где

$P_{Z\,max} = P_{Z\,уд} \cdot b a_{1\,max} = P_{Z\,уд} b S_z \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)_t$ [9, с. 201]; $P_{Z\,уд}$ – удельная сила резания, $Н/мм^2$; $b = R_{рк} \arcsin\left(\frac{B}{2R_{рк}}\right)$ – длина профиля фасонной фрезы; $a_{1\,max}$ – максимальная толщина среза, переменная величина, зависящая от текущего радиуса фрезы и режима фрезерования; B – высота фрезы; S_z – подача заготовки на зуб, мм/зуб; $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)_t$ – текущий угол контакта инструмента с заготовкой, который при профильном фрезеровании также изменяется по высоте фасонной фрезы.

Главная составляющая $P_{Z\,окр}$ силы резания, усредненная по окружности, представляет собой расчетную и постоянно действующую в течение оборота силу [2, с. 217]:

$$P_{Z\,окр} = P_{Z\,ср} \frac{z(\varepsilon_1+\varepsilon_2)_t}{2\pi}, \qquad (8)$$

где z – число зубьев фрезы.

Радиальная составляющая $P_{y\,окр}$, усредненная по окружности [90, с. 202],

$$P_{y\,окр} = P_{y\,ср} \frac{z(\varepsilon_1+\varepsilon_2)_t}{2\pi}. \qquad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что $P_{Z\,окр}$, $P_{y\,окр}$ также являются переменными величинами, зависящими от расстояния рассматриваемого поперечного сечения фрезы до ее геометрического центра. Указанное расстояние определяет значение текущего радиуса фрезы и тем самым влияет на угол контакта $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)_i$ режущего инструмента изаготовки.

При фрезеровании сбежистой заготовки с положительным приращением припуска происходит увеличение глубины резания с каждым проходом режущей пластины зоны контакта инструмента и заготовки, а, следовательно, увеличение угла контакта и толщины срезаемого слоя. С увеличением толщины срезаемого слоя во всех случаях резания установившийся процесс резания переходит в неустановившийся. Качество обработанной поверхности ухудшается [24, с. 60].

При фрезеровании сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска происходит уменьшение глубины резания, угла контакта $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)_t$ и толщины срезаемого слоя.

Приращение времени на выполнение единичного реза при обработке сбежистой заготовки ($-\beta_{сб}$), содержит знак минус (рис. 2), поэтому с позиций обеспечения высокой точности обработанной поверхности упругие деформации заготовки будут снижаться, а, следовательно, будут снижаться и геометрические погрешности. Профильное фрезерование с направлением заготовки вершинным концом упрощает ее ориентацию в начальной стадии обработки. Однако, уменьшение времени единичного реза в общей структуре $t_в$, характерное для фрезерования сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска, вызывает увеличение времени отдыха $\tau_{отд}$ и повышение уровня вибрации элементов технологической системы.

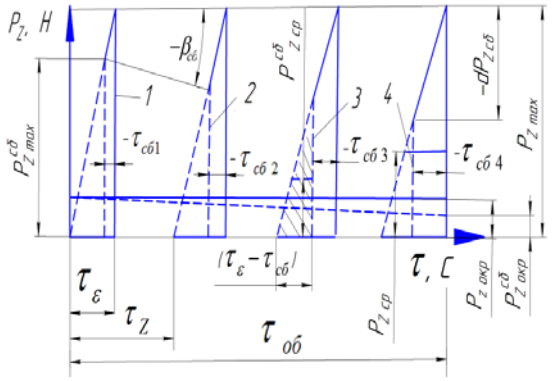

Рис. 2 – Изменение силы F_Z при фрезеровании сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска

С учетом превалирующего влияния упругих деформаций заготовки на процесс формообразования можно предположить, что при фасонном фрезеровании сбежистой заготовки с отрицательным приращением припуска будет обеспечена более высокая геометрическая точность готового изделия. Можно ожидать, что повышению геометрической точности обработанных поверхностей изделий из отходов лесопиления будет способствовать начальное фрезерование с наименьшей глубиной резания, при которой проще осуществлять коррекцию пространственного положения заготовки в начале фрезерования.

Начальная обработка с максимальной глубиной резания, характерная для направления заготовки в зону резания комлевым концом, протекает более с высокими значениями силы резания, что вызывает определенные трудности в их преодолении при необходимости дополнительных поворотов заготовки. Длина отходов лесопиления, подвергаемых профильному фрезерованию, составляет 2…3 метра, а сбежистость заготовки, допускаемая ГОСТом, – 10 мм на 1 м длины, В таких условиях профильное фрезерование, начатое с вершинного конца с глубиной резания, например, 12 мм, в конце заготовки длиной 3 м будет протекать с глубиной резания 42 мм.

Начальная обработка будет протекать без высокого уровня вибрации элементов технологической системы, но в конце фрезерования заготовки, характеризующегося многократным увеличением снимаемого припуска, возможны ситуации, сопровождающиеся интенсивной вибрацией, резким снижением качества обработанной поверхности. Снятие столь значительного припуска за один проход приведет либо к останову привода главного движения либо выбросу заготовки из зоны резания.

В такой ситуации механическая обработка отходов лесопиления, нестабильных с технологической точки зрения, возможна либо на ползучих рабочих подачах, либо внедрением в станочное оборудование системы автоматического регулирования мощности фрезерования, которая позволит уменьшить скорость рабочей подачи в экстремальных условиях резания.

Чтобы процесс профильного фрезерования отходов лесопиления протекал а заданном режиме и для управления его параметрами в ходе обработки, необходимо иметь значения энергетических показателей процесса и, в первую очередь, мощности и силы резания. Для этого необходимо располагать не только математическими моделями, но и значениями поправочного коэффициента на профильное фрезерование, что позволит упростить процедуру их расчета.

Поправочный коэффициент на профильное фрезерование можно определить как отношение объемов срезаемого слоя при профильном и плоском фрезеровании:

$$a_{пр} = \frac{V_{пр}}{V_{пл}} = \frac{2F_{сл}R_{рк}\arcsin\left(\frac{B}{2R_{рк}}\right)}{F_{пл}B}, \quad B \le 2R_{рк} \qquad (10)$$

где $V_{пр}, V_{пл}$ – соответственно объем срезаемого слоя при профильном и плоском фрезерованияя; $F_{сл}, F_{пл}$ – соответственно площадь срезаемого слоя при профильном и плоском фрезеровании.

Поправочный коэффициент выражается также через элементы режима резания и размерные характеристики режущего инструмента:

$$a_{пр} = \frac{e_z\left[z-\left(R_{max}+R_{min}-\sqrt{R_{max}^2-\left(\frac{S_z}{2}\right)^2}-\sqrt{R_{min}^2-\left(\frac{S_z}{2}\right)^2}\right)\right]}{B\left[z-R+\sqrt{R^2-\left(\frac{S_z}{2}\right)^2}\right]}, \qquad (11)$$

где $\ell_1 = 2R_{рк}\arcsin\left(\frac{B}{2R_{рк}}\right)$ – длина профиля фасонной фрезы.

Анализ формулы (11) показал, что поправочный коэффициент наиболее существенно зависит от радиуса профиля $R_{рк}$ и высоты В фрезы.

Увеличение радиуса $R_{рк}$ приводит к асимптотическому уменьшению коэффициента $a_{пр}$ (рис. 3). Кривые 1–3 соответствуют значениям высоты фасонной фрезы В=100; 120 и 140 мм. Увеличение высоты фасонной фрезы вызывает возрастание поправочного коэффициента $a_{пр}$ (рис. 4). Кривые 1 – 3 соответствуют значениям $R_{рк} = 62{,}5$; 80 и 90 мм.

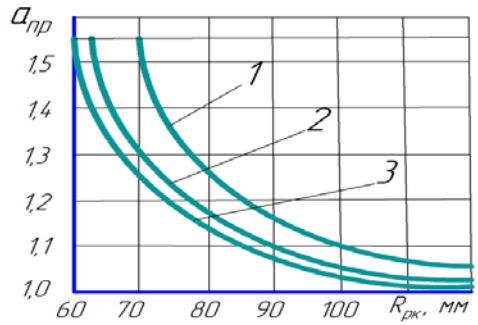

Рис. 3 – Зависимость поправочного коэффициента от радиуса профиля фасонной фрезы

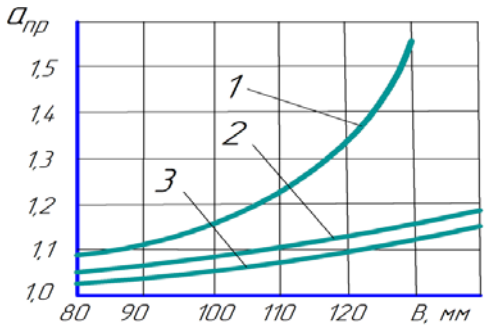

Рис. 4 – Зависимость поправочного коэффициента от высоты фасонной фрезы

Таблица 1 - Поправочный коэффициент $a_{пр}$ на профильное фрезерование древесины

Радиус профиля фрезы $R_{рк}$, мм	Высота фрезы В, мм					
	80	100	120	140	160	180
60	1,09	1,18	1,57	-	-	-
70	1,06	1,11	1,20	1,57	-	
80	1,05	1,08	1,13	1,22	1,57	
90	1,04	1,06	1,09	1,15	1,23	1,57
100	1,02	1,07	1,07	1,11	1,16	1,24

Ценными являются значения коэффициента $a_{пр}$ при интерактивном изменении факторов $R_{рк}$ и В, которые получены на основании расчетов по (10) и приведены в таблице 1.

Для проверки численных значений поправочного коэффициента были проведены эксперименты. На станке ПФП-100, разработанном и изготовленном авторами, проводили цилиндрическое и профильное фрезерование отходов лесопиления из сосны естественной влажности.

Перед выполнением указанных видов фрезерования периферийные сегменты подвергали предварительной обработке для исключения влияния случайных факторов на результаты эксперимента и, прежде всего, стохастического изменения припуска и наличие сучков. Предварительно обработанные заготовки подвергали цилиндрическому и профильному фрезерованию при одинаковой глубине резания, рабочей подаче заготовки и скорости резания.

Использовали цилиндрическую и фасонную фрезы с 4-мя режущими пластинами одинаковой геометрии из инструментальной стали Р6М5 с углом наклона к оси вращения инструмента, равным нулю. Наружные диаметры фрез составляли 180 мм, высота 100 мм. Радиус профиля фасонной фрезы $R_{рк}$=100 мм, минимальный радиус $R_{min} = 130$ мм.

Мощность резания определяли по показаниям аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а опыты проводили в нерабочие дни, что обеспечило стабильное напряжение, подаваемое на электродвигатель привода главного движения режущего инструмента. Для цилиндрического фрезерования показания АЦП составили 8,20 единиц, а для профильного фрезерования – 8,68 единиц. Превышение мощности при профильном фрезеровании составило 0,48 единиц, что в процентном отношении к цилиндрическому фрезерованию составляет 6%. Следовательно, коэффициент на профильное фрезерование для приведенных размерных характеристик фасонного инструмента составляет 1,06. Табличное значение коэффициента на профильное фрезерование составляет 1,07 (таблица), что свидетельствует о хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Расчетные значения поправочного коэффициента на профильное фрезерование были проверены также для цилиндрических и фасонных фрез высотой 120 мм и наружным диаметром 155 мм. Радиус профиля фасонной фрезы $R_{рк}$ =80 мм, в результате была получена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных 4,6%.

Таким образом, профильное фрезерование отходов лесопиления, имеющих сбежистость, характеризуется перманентным и значительным изменением силы резания, а также перераспределением элементарных составляющих времени цикла «резание - отдых», что влияет на уровень вибрации элементов технологической системы. Получены аналитические зависимости, устанавливающие связь поправочного коэффициента на удельную работу резания при профильном фрезеровании древесины с размерными параметрами фасонной фрезы, что упрощает расчеты энергетических показателей процесса профильного фрезерования древесины.

Литература

1. Амалицкий, В. В. Деревообрабатывающие станки и инструменты: учебник / В. В. Амалицкий, В. В. Амалицкий. – М.: ИРПО, 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. Глебов, И. Т. Резание древесины: учеб. пособие / И. Т. Глебов.– Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2007.– 228 с.– ISBN 5–230–25681–8.
4. Фомин, А. А Механическая обработка отходов древесины – Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий / А. А. Фомин, В. Г. Гусев. – М.: РАН. – 2011. – 128 с. – ISBN 978-5-904197-19-3.
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. - №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. - №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.