

УДК 674.055

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТА СТРУЖКИ В СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКЕ
ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛИТНЫХ
ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

П. В. РУДАК, Д. В. КУИС, О. Г. РУДАК, А. С. КРАВЧЕНКО

*Учреждение образования «Белорусский государственный
технологический университет», г. Минск*

АНТАНАС БАЛТРУШАЙТИС, ГИНТАРАС КЯТУРАКИС

*Каунасский технологический университет,
Литовская Республика*

Введение

Древесные материалы (древесностружечные плиты (ДСтП), древесноволокнистые плиты (ДВП), древесноволокнистые плиты средней плотности (MDF) и др.) находят широкое применение в технике. Процесс их фрезерования является одним из самых распространенных среди процессов резания в деревообработке, при этом проблемой практически всех предприятий является эффективное удаление стружки и пыли из зоны резания [1].

В отличие от металлообработки, где скорости резания и подачи относительно невелики, широко применяются смазывающе-охлаждающие жидкости (СОЖ), способствующие удалению стружки, дереворежущие фрезы эксплуатируются при частотах 1000–24000 мин⁻¹ и скоростях подачи 3–60 м/мин без СОЖ в связи с чем древесные стружка и пыль приобретают высокие начальные скорости, что затрудняет их улавливание [2]. Не уловленная крупная стружка распространяется на 3–5 м от зоны обработки, попадает на направляющие станка и, ухудшая условия их эксплуатации, сокращает ресурс. Попадая в зону действия инфракрасных датчиков систем безопасности современных станков, вызывает их аварийные остановки, приводящие к браку продукции, повышенному износу режущих элементов.

В связи с высокими частотами вращения дереворежущих фрез стружка, срезанная за один оборот инструмента, не всегда полностью удаляется из межзубой впадины, оказывает подпор, затрудняет срезание новой стружки, увеличивает мощность, затрачиваемую на резание. Кроме этого высокие частоты эксплуатации дереворежущих фрез в условиях недостаточно эффективной аспирации зоны резания приводят к эффекту повторного перерезания стружки, уже отделенной от заготовки [3]. Это провоцирует повышенный износ резцов и дополнительные энергетические потери на резание.

Загрязнение оборудования и околостаночного пространства стружкой и пылью сокращает производительность труда, увеличивает непроизводительные потери времени на уборку. Неэффективность системы аспирации приводит к неполному использованию производительности и технических возможностей оборудования.

При недостаточной эффективности системы аспирации ухудшаются пожарные и санитарные условия труда. Работающий испытывает неблагоприятное воздействие пыли на органы дыхания, зрения, кожные покровы.

Процесс аспирации в деревообрабатывающей промышленности характеризуется высоким уровнем энергетических затрат. Мощность на фрезерование древесных материалов не превышает 1 кВт, в то время как мощность привода вентилятора системы аспирации часто составляет 6–30 кВт.

Одним из направлений разработки энергосберегающей системы эффективного удаления отходов из зоны резания фрезерных деревообрабатывающих станков является использование кинетической энергии стружки и пыли – их направление в сторону стружкоприемника или накопителя и организация воздушных потоков через зону обработки [3].

Постановка задачи

Направление стружки, покидающей зону резания, в требуемом направлении может быть реализовано за счет создания угла наклона кромки лезвия фрезы.

При этом использование кинетической энергии стружки для повышения эффективности ее аспирации должно основываться на математическом моделировании процесса выхода стружки из зоны резания с учетом широкого диапазона значений параметров режима фрезерования [4].

Цель исследования, результаты которого представлены в данной работе, – установление закономерностей движения частиц стружки и пыли при выходе из зоны резания плитных древесных материалов при фрезеровании в широких диапазонах параметров режима резания.

Задачи исследования – при фрезеровании плитных древесных материалов в широких диапазонах параметров режима резания установить: 1) влияние угла наклона кромки на угол схода стружки; 2) влияние угла наклона кромки на скорость движения стружки вдоль лезвия и скорость выхода стружки из зоны резания; 3) влияние частоты вращения фрезы на угол схода стружки; 4) сопоставление полученных экспериментальных данных об углах схода стружки в процессе фрезерования ДСтП с результатами расчетов по разработанной математической модели.

Основная часть

Для математического моделирования процесса выхода стружки из зоны резания рассмотрим древесную частицу (элемент стружки) массой m древесностружечной плиты (ДСтП), находящуюся в стружечной канавке инструмента и участвующую в круговом движении с циклической частотой ω в результате вращения фрезы радиусом R , осуществляющей полное фрезерование (раскрой плитного древесного материала) (рис. 1, а).

Частица стружки участвует в прямолинейном движении со скоростью V_x вдоль поверхности лезвия, характеризуемого углом наклона кромки λ . При повороте фрезы на угол, обеспечивающий освобождение межзубой впадины, стружка покинет ее со скоростью $V_{\text{вых}}$, двигаясь при этом под углом ν схода стружки (рис. 1, б). Скорость $V_{\text{вых}}$ выхода стружки из межзубой впадины фрезы является векторной суммой скорости кругового движения V_ω и скорости V_x движения частицы стружки вдоль лезвия.

Движение частицы стружки рассмотрим в системе координат XYZ , вращающейся вместе с фрезой с частотой ω . При этом ось X ориентируем параллельно направлению движения стружки вдоль лезвия, а ось Y – нормально к указанному направлению.

Поскольку форма единичной стружки сильно отличается от сферической, а движение рассматривается в пределах короткого промежутка времени, то принимаем, что относительно лезвия стружка участвует исключительно в прямолинейном движении.

Двигаясь вдоль лезвия, частица стружки испытывает действие центробежной силы $F_{ц}$, силы Кориолиса F_c , а также реакции поверхности обрабатываемого материала N_1 (рис. 1, а).

Движению частицы стружки относительно обрабатываемого материала противодействует направленная в сторону, обратную движению, сила трения $F_{тр1}$ между поверхностью частицы и поверхностью обрабатываемого материала. Частица испытывает также воздействие силы тяжести F_T и силы реакции N_2 поверхности лезвия.

Пренебрегая аэродинамическими, электростатическими силами и силами, действующими на частицу стружки со стороны других частиц, запишем уравнение баланса сил, действующих на частицу стружки:

$$m\vec{a} = \vec{F}_T + \vec{F}_c + \vec{F}_{ц} + \vec{F}_{тр1} + \vec{F}_{тр2} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2. \quad (1)$$

Введем вспомогательный угол $\chi = 90^\circ - \lambda$ и выполним проецирование сил, действующих на частицу стружки, на оси координат.

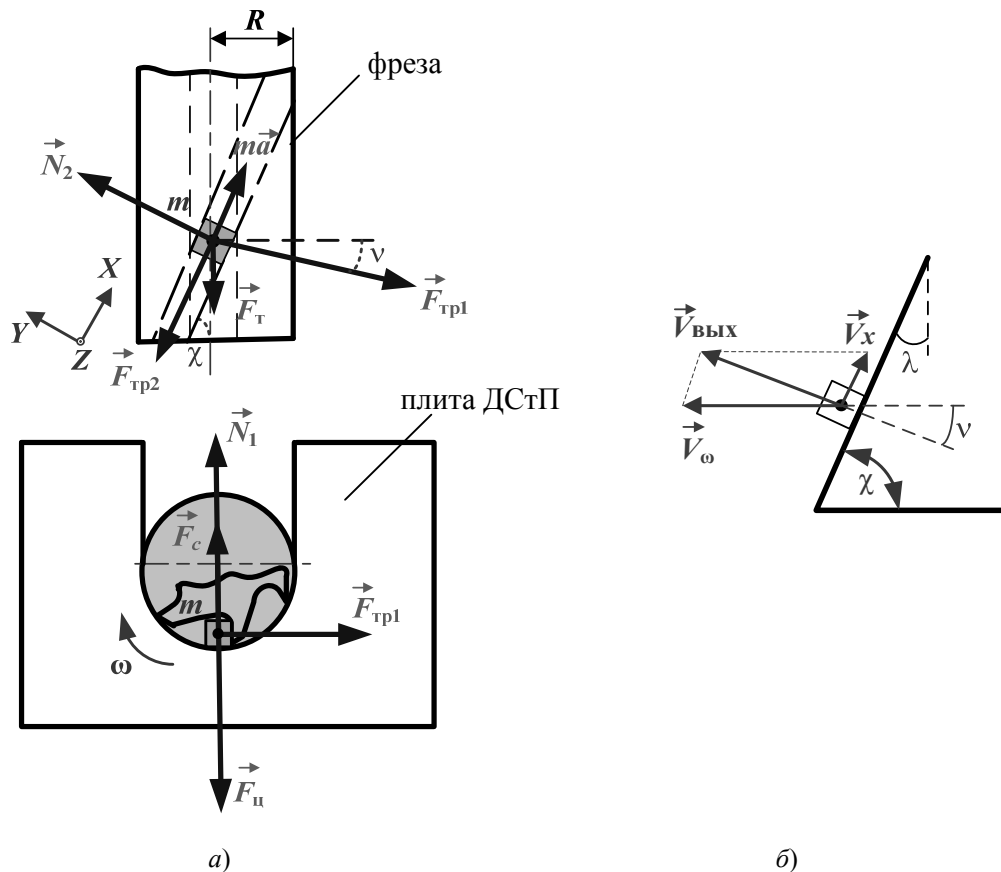


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу стружки в межзубой впадине фрезы (а), и схема векторов скоростей движения частицы стружки (б)

В проекциях на ось X :

$$ma_x = -F_{тр2} + F_{тр1} \cos(\nu + \chi) - mg \sin \chi. \quad (2)$$

В проекциях на ось Y :

$$0 = N_2 - mg \cos \chi - F_{тр1} \sin(\nu + \chi). \quad (3)$$

В проекциях на ось Z :

$$0 = F_{\text{ц}} - F_c - N_1. \quad (4)$$

Силу трения между частицей стружки и поверхностью обрабатываемого материала определяем по формуле

$$F_{\text{тр1}} = \mu_1 N_1, \quad (5)$$

где μ_1 – коэффициент трения между частицей стружки и поверхностью обрабатываемого материала.

Силу трения между частицей стружки и поверхностью лезвия определяем по формуле

$$F_{\text{тр2}} = \mu_2 N_2, \quad (6)$$

где μ_2 – коэффициент трения между частицей стружки и поверхностью лезвия.

С учетом уравнения (4) записываем выражение для определения силы трения между частицей стружки и поверхностью обрабатываемого материала:

$$F_{\text{тр1}} = \mu_1 m (\omega^2 R - 2\omega V_x \cos \chi). \quad (7)$$

Из уравнения (3):

$$N_2 = mg \cos \chi + \mu_1 m (\omega^2 R - 2\omega V_x \cos \chi) \sin(\nu + \chi). \quad (8)$$

С учетом уравнений (2) и (7), а также, зная, что ускорение $a = \dot{V}_x$, получим дифференциальное уравнение:

$$\dot{V}_x = -\mu_2 \frac{N_2}{m} + \mu_1 (\omega^2 R - 2\omega V_x \cos \chi) \cos(\nu + \chi) - g \sin \chi. \quad (9)$$

Из векторной суммы скоростей (рис. 1, б) получаем:

$$\cos(\nu + \chi) = \frac{\omega R \cos \chi - V_x}{\sqrt{V_x^2 + (\omega R)^2 - 2V_x \omega R \cos \chi}}. \quad (10)$$

Уравнения (8)–(10) позволяют определять угол схода стружки с учетом широких диапазонов значений частоты вращения и радиуса фрезы, угла наклона кромки, массы стружки, коэффициентов трения стружки по поверхности обрабатываемого материала и по поверхности лезвия.

Проанализируем влияние значений параметров режима фрезерования на величины угла схода стружки, скорость движения стружки вдоль лезвия и скорость выхода стружки из зоны резания.

Для решения уравнений и построения графических зависимостей был применен математический пакет Math CAD 15. Масса стружки принималась $m = 1$ г.

На рис. 2 представлена графическая зависимость угла ν схода стружки от угла λ наклона кромки при диаметре хвостовой фрезы 20 мм, частоте n вращения фрезы 24000 мин⁻¹.

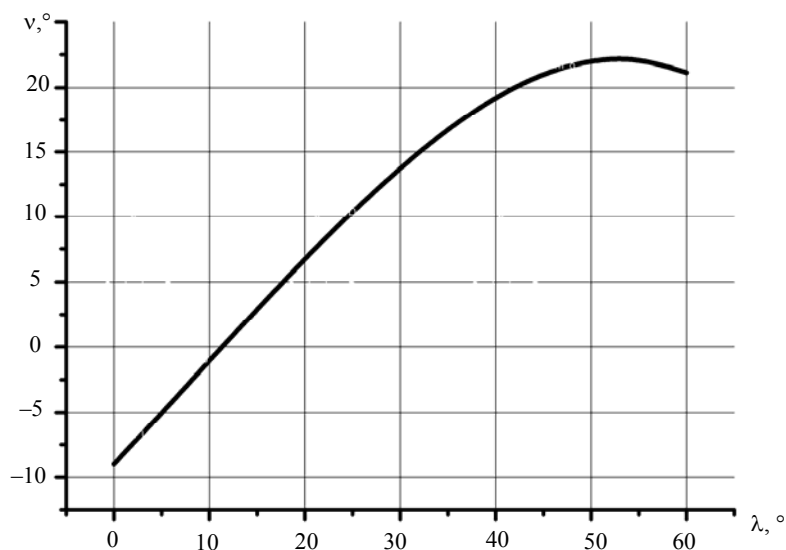


Рис. 2. Зависимость угла ν схода стружки от угла λ наклона кромки при диаметре хвостовой фрезы 20 мм, частоте n вращения фрезы 24000 мин^{-1}

При значениях угла λ наклона кромки от 0° до $11,3^\circ$ угол ν схода стружки отрицателен – стружка при выходе направлена вниз. При $\lambda = 11,3^\circ$ угол схода стружки $\nu = 0$ – стружка покидает зону резания, двигаясь в плоскости, перпендикулярной оси вращения фрезы. При дальнейшем увеличении угла λ стружка покидает зону резания, будучи направленной вверх. Так, при угле $\lambda = 25^\circ$ угол схода стружки $\nu = 10,4^\circ$. С увеличением угла λ более 55° угол ν начинает уменьшаться.

На рис. 3 представлены зависимости скорости V_x движения стружки вдоль лезвия и скорости $V_{\text{вых}}$ выхода стружки из зоны резания от угла λ наклона кромки при диаметре хвостовой фрезы 20 мм, частоте вращения фрезы 24000 мин^{-1} .

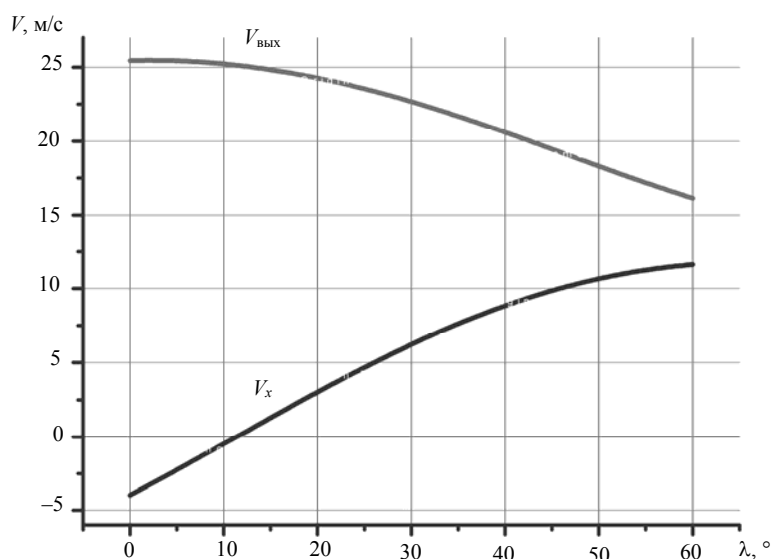


Рис. 3. Зависимости скорости V_x движения стружки вдоль лезвия и скорости $V_{\text{вых}}$ выхода стружки из зоны резания от угла λ наклона кромки при диаметре хвостовой фрезы 20 мм, частоте вращения фрезы 24000 мин^{-1}

Увеличение угла λ вызывает увеличение скорости V_x движения стружки вдоль лезвия. Вектор скорости V_x направлен вдоль лезвия вниз в интервале значений угла λ от 0° до $11,3^\circ$.

На рис. 4 представлена зависимость угла ν схода стружки от частоты n вращения хвостовой фрезы при диаметре фрезы 20 мм, угле наклона кромки $\lambda = 25^\circ$.

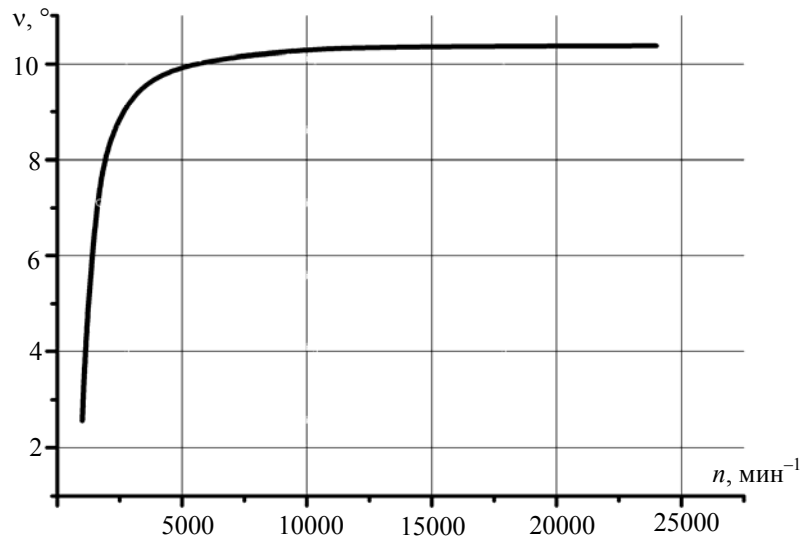


Рис. 4. Зависимость угла ν схода стружки от частоты n вращения хвостовой фрезы при диаметре фрезы 20 мм, угле наклона кромки $\lambda = 25^\circ$

При частоте вращения фрезы $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ угол схода стружки $\nu = 2,6^\circ$, при частоте вращения фрезы $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ угол схода стружки $\nu = 9,4^\circ$, и с дальнейшим увеличением частоты вращения угол схода стружки изменяется незначительно, оставаясь на уровне $\nu = 10^\circ$.

На рис. 5 представлены графические зависимости угла ν схода стружки от коэффициента трения μ_1 стружки по поверхности обрабатываемого материала (при $\mu_2 = 0,2$) и от коэффициента трения μ_2 стружки по поверхности лезвия (при $\mu_1 = 0,5$) при диаметре фрезы 20 мм, угле наклона кромки $\lambda = 25^\circ$.

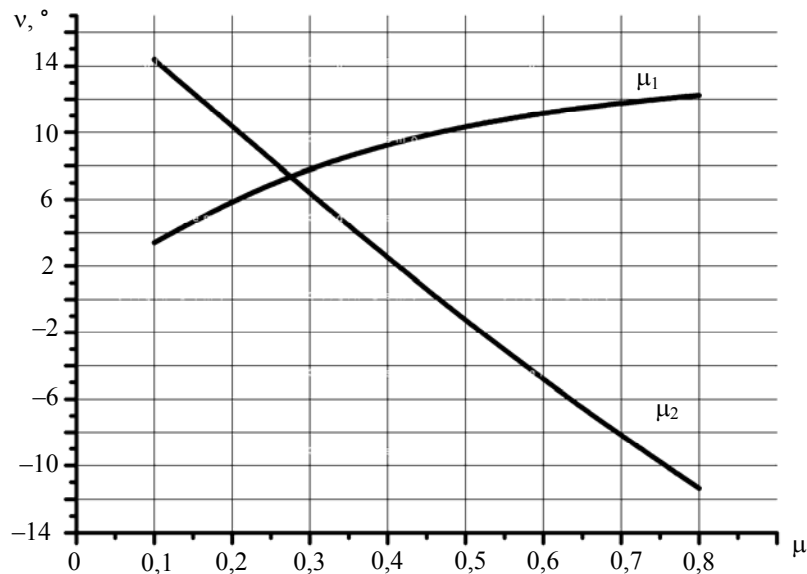


Рис. 5. Зависимости угла ν схода стружки от коэффициента трения μ_1 стружки по поверхности обрабатываемого материала (при $\mu_2 = 0,2$) и от коэффициента трения μ_2 стружки по поверхности лезвия (при $\mu_1 = 0,5$) при диаметре фрезы 20 мм, угле наклона кромки $\lambda = 25^\circ$

При значении коэффициента μ_2 трения стружки по поверхности лезвия более 0,45 угол схода стружки приобретает отрицательное значение.

Определение триботехнических характеристик инструмента при фрезеровании ДСтП на основе экспериментальных исследований

Применение разработанной математической модели процесса выхода стружки из зоны резания для расчета углов схода стружки в процессе фрезерования ДСтП в широких диапазонах параметров режима резания требует определения коэффициентов трения μ_1 и μ_2 .

Особенности процесса резания древесных материалов значительны и уникальны – не могут быть всецело воссозданы на испытательных машинах для исследования триботехнических характеристик по стандартным методикам (например, по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел на трибометре).

Таким образом, триботехнические характеристики инструмента следует устанавливать по результатам экспериментальных исследований в условиях реального процесса резания. Такие данные отсутствовали.

Определение коэффициента трения μ_1 и μ_2 на основе экспериментальных исследований при фрезеровании ДСтП в широких диапазонах параметров режима резания выполнялось на основе методики, разработанной на кафедре материаловедения и технологии металлов БГТУ.

Особенностью данной методики является использование для триботехнических испытаний инструмента разработанной экспериментальной установки для исследования коэффициентов трения, созданной на основе современного деревообрабатывающего центра с числовым программным управлением, оснащенного двумя рабочими столами и силоизмерительной системой. Для обработки сигнала от измерительной системы применена фильтрация методом усреднения накопленных значений с накоплением 128 сэмплов с использованием цифрового запоминающего осциллографа ТЕКТРОНИХ TDS 2024В (США) [5].

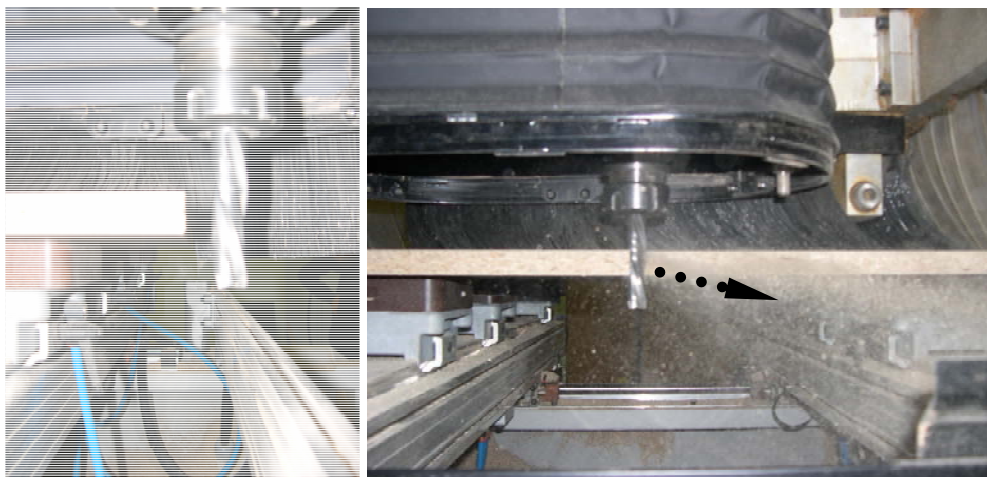
Определение углов схода стружки на основе экспериментальных исследований процесса фрезерования ДСтП в широких диапазонах параметров режима резания

В ходе экспериментальных исследований углов схода стружки на деревообрабатывающем центре с ЧПУ ROVER В 4.35 (Италия) (рис. 6) осуществлялось фрезерование ДСтП хвостовыми фрезами различных конструкций на различных режимах резания (диаметр фрез 7–24 мм, число режущих элементов 1–3 шт., угол наклона кромки $-5-20^\circ$, частота вращения фрезы 3000–24000 мин⁻¹, подача на нож 0,1–1,5 мм). Процесс выхода стружки из зоны резания фиксировался фотосъемкой цифровым фотоаппаратом Nikon COOLPIX L14, далее фотографии переносились на персональный компьютер, где анализировались. Углы схода стружки определялись в САПР КОМПАС 3D v.12.

На рис. 7 и 8 представлены примеры картин выхода стружки и пыли из зоны резания. Установлено, что в процессе фрезерования ДСтП зону резания покидают одновременно стружка и пыль, причем их количество и соотношение зависят от режима резания.

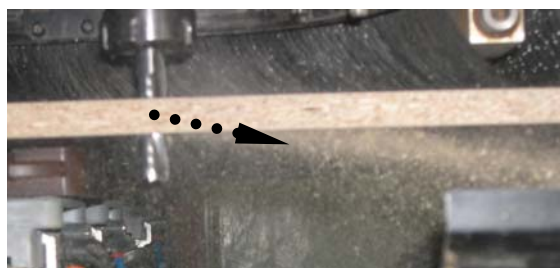


Рис. 6. Деревообрабатывающий центр с ЧПУ ROVER B 4.35 с закрепленной на рабочем столе станка заготовкой ДСтП



а)

б)



в)

Рис. 7. Цельная твердосплавная фреза $\varnothing 16$ мм, $z = 3$ шт., $\lambda = 20^\circ$, в шпинделе станка (а) и выход стружки и пыли из зоны резания при неполном фрезеровании (б), а также при полном фрезеровании (в)

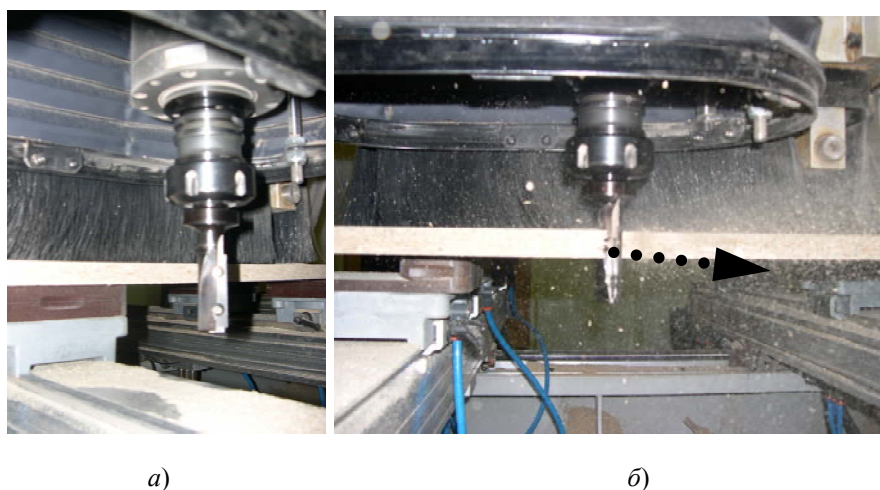


Рис. 8. Сборная фреза $\varnothing 20$ мм со сменными твердосплавными ножами, $z = 1$ шт., $\lambda = 0^\circ$, установленная в шпинделе станка (а) и выход стружки и пыли из зоны резания при неполном фрезеровании (б)

Заключение

В результате выполнения работы установлены закономерности движения частиц стружки и пыли при выходе из зоны резания плитных древесных материалов при фрезеровании в широких диапазонах параметров режима резания. Установлены математические зависимости, позволяющие определять угол схода стружки с учетом широких диапазонов значений частоты вращения и радиуса фрезы, угла наклона кромки, массы стружки, коэффициентов трения стружки по поверхности обрабатываемого материала и по поверхности лезвия.

Установлено, что при увеличении угла λ наклона кромки от 0° до $11,3^\circ$ угол ν схода стружки отрицателен – стружка при выходе направлена вниз. При $\lambda = 11,3^\circ$ угол схода стружки $\nu = 0$ – стружка покидает зону резания, двигаясь в плоскости, перпендикулярной оси вращения фрезы. При дальнейшем увеличении угла λ стружка покидает зону резания, будучи направленной вверх.

С увеличением угла λ более 55° угол ν начинает уменьшаться.

Установлена зависимость угла ν схода стружки от частоты n вращения фрезы. Для фрезы диаметром 20 мм, угла наклона кромки $\lambda = 25^\circ$ при частоте вращения фрезы $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ угол схода стружки $\nu = 2,6^\circ$, а при частоте вращения фрезы $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ угол схода стружки $\nu = 9,4^\circ$, и с дальнейшим увеличением частоты вращения угол схода стружки изменяется незначительно, оставаясь на уровне $\nu = 10^\circ$.

Диаметр фрезы не оказывает существенного влияния на угол ν схода стружки.

Установлено значительное влияние на угол ν схода стружки коэффициентов трения μ_1 стружки по поверхности обрабатываемого материала и коэффициента трения μ_2 стружки по поверхности лезвия.

Для достоверного определения параметров выхода стружки из зоны резания с целью разработки методики и средств ее эффективного улавливания большое значение имеет точность определения коэффициентов трения. В связи со сложностью и многообразием процессов, сопровождающих фрезерование древесных материалов, на кафедре материаловедения и технологии металлов БГТУ разработана методика триботехнических испытаний инструмента при фрезеровании ДСтП.

На основе экспериментальных исследований в процессе фрезерования ДСтП в широких диапазонах параметров режима резания (диаметр фрезы 7–24 мм, число

режущих элементов 1–3 шт., угол наклона кромки $-5-20^\circ$, частота вращения фрезы 3000–24000 мин^{-1} , подача на нож 0,1–1,5 мм) по разработанной методике установлены коэффициенты трения μ_1 и μ_2 , с учетом которых по разработанной математической модели процесса выхода стружки из зоны резания рассчитаны углы схода стружки. В процессе фрезерования ДСтП в широких диапазонах параметров режима резания выполнено экспериментальное определение углов схода стружки. Сопоставление значений углов схода стружки, полученных в результате экспериментов, с результатами расчетов по разработанной математической модели показало их высокую сходимость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках научно-исследовательского проекта T12M-098.

Литература

1. Рудак, П. В. Снижение шумовых характеристик и повышение эффективности удаления стружки из зоны резания при эксплуатации дереворежущих машин / П. В. Рудак, Д. В. Куис // Тр. БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. – 2011. – Вып. XIX. – С. 245–247.
2. Нечепаев, В. Г. Системный подход к проектированию устройств удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов / В. Г. Нечепаев, А. Н. Гнисько // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – Вип. № 17. – С. 302–307.
3. Рудак, П. В. Эффективное удаление стружки и пыли из области обработки в процессе фрезерования древесных материалов / П. В. Рудак, Д. В. Куис // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–26 нояб. 2010 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2010. – С. 121–124.
4. Нечепаев, В. Г. Математична модель переміщення стружки різальним інструментом при фрезеруванні закритих профільних пазів / В. Г. Нечепаев, А. Н. Гнисько // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк : ДонНТУ, 2005. – Випуск. 92. – С. 72–82.
5. Рудак, П. В. Триботехнические испытания твердосплавных неперетачиваемых режущих пластин с покрытиями при цилиндрическом фрезеровании древесностружечных плит / П. В. Рудак, Д. В. Куис // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : тр. VII Междунар. евраз. симпоз., Екатеринбург, 23–25 мая 2012 г. / Урал. гос. лесотехн. ун-т ; под ред. В.Г. Новоселова. – Екатеринбург, 2012.

Получено 25.10.2012 г.