

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 674.055

**РУДАК**  
**Павел Викторович**

**ЭНЕРГО- И РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ  
ОБЛИЦОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ КОНЦЕВЫМИ  
ФРЕЗАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.21.05 – древесиноведение,  
технология и оборудование деревообработки

Минск 2010

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов

Научный руководитель

**Гришкевич Александр Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Врублевская Валентина Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор кафедры деталей машин, путевых и строительных машин учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»;

**Карпович Семен Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация

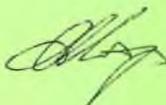
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится «20» апреля 2010 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.06 в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4. Тел.: (017) 227-83-41, факс: (017) 227-62-17, электронная почта: root@bstu.unibel.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «19» марта 2010 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



С.П. Мохов

## ВВЕДЕНИЕ

Древесностружечные плиты (ДСтП), облицованные натуральными и синтетическими листовыми материалами, весьма востребованы промышленностью. Их выпуск в настоящее время во всем мире неуклонно расширяется. В Республике Беларусь согласно государственной программе инновационного развития на 2007–2010 годы реализуются проекты создания новых и модернизации действующих производств ДСтП с общим объемом финансирования более 325 млрд. рублей.

Для получения из облицованных ДСтП мебельных, строительных и других деталей разнообразной формы широко применяют концевые фрезы, обеспечивающие возможность не только обрабатывать заготовку по периметру (снимаемый припуск меньше диаметра фрезы), но и осуществлять ее раскрой (снимаемый припуск равен диаметру фрезы). Это позволяет за одну установку заготовки на рабочем столе станка изготавливать целый комплект деталей.

Наиболее распространено фрезерование концевыми фрезами, при котором режущие кромки инструмента в процессе вращения описывают цилиндрическую поверхность (цилиндрическое фрезерование), что позволяет осуществлять чистовую обработку боковых поверхностей заготовок параллельно оси вращения инструмента. Именно такого рода боковые поверхности находят наибольшее распространение в изделиях из ДСтП.

Однако, несмотря на достоинства технологии, основанной на использовании цилиндрических концевых фрез, эффективность их промышленного применения не вполне отвечает современным требованиям. Энергоемкость фрезерования высока, появление дефектов на обработанной поверхности непредсказуемо, удаление отходов из зоны резания затруднено, что вызывает нежелательное доизмельчение стружки. Кроме того, концевые фрезы в процессе эксплуатации подвергаются интенсивному усталостному разрушению, а их лезвия изнашиваются неравномерно.

Опубликованные результаты научных исследований по вопросам фрезерования плитных древесных материалов концевыми фрезами малочисленны, носят частный характер и не могут быть использованы для управления работой современного оборудования с достижением высоких результатов.

Это предопределило направление и содержание диссертационных исследований, включающих: установление взаимосвязей режимных параметров процесса обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами; регламентацию пределов работоспособности фрез по критерию усталостной прочности; достижение наиболее полного удаления стружки из зоны резания; разработку способа фрезерования с осцилляцией, обеспечивающего равномерный износ лезвий в процессе фрезерования.

В результате достигается повышение эффективности обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами за счет энерго- и ресурсосбережения.

1365 ар



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Связь работы с крупными научными программами, темами.*

Научные исследования, проведенные в диссертации, соответствуют основным направлениям научной деятельности учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» на 2006–2010 гг. и использовались при разработке следующих научных тем:

1. Республиканская госбюджетная тема ГБ 8-06 «Совершенствование процессов механической обработки древесины и древесных материалов», 2006–2010 гг.;

2. Государственная программа ориентированных фундаментальных исследований ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» (Республиканская госбюджетная тема ГБ 29-170 «Исследование процессов генерирования плазмы импульсного катодно-дугового разряда и создание высокоэффективного генератора углеродной плазмы, систем его питания и управления технологическими процессами осаждения упрочняющих покрытий», № ГР 20091894, раздел, посвященный разработке износостойких покрытий для резцов концевых фрез, обрабатывающих ДСтП);

3. Научно-техническая программа Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» (БС 29-435, № ГР 20093561, шифр программы «Нанотехнология СГ»), утвержденная постановлением Совета Министров Союзного Государства от 26 июня 2009 г. № 22, сроки выполнения 10.09.2009–31.12.2012 гг. (раздел, посвященный разработке наноструктурированных износостойких покрытий для резцов концевых фрез, обрабатывающих ДСтП).

**Цель и задачи исследований.** Цель работы – научное обоснование и разработка режимов обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами с достижением эффекта энерго- и ресурсосбережения.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

1. Определить значимые режимные факторы обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами, влияющие на энергетические затраты и образование дефектов продукции.

2. Разработать методику проведения экспериментальных исследований для установления влияния значимых режимных факторов процесса обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами на силы и мощность резания, образование дефектов продукции.

3. Установить математическую зависимость величины средней толщины стружки, срезаемой концевой фрезой, от ее радиуса, подачи на зуб, снимаемого припуска с учетом полного угла контакта лезвия с обрабатываемым материалом.

4. Рассчитать максимальные силы резания, допустимые при обработке облицованных древесностружечных плит с заданным коэффициентом запаса по критерию усталостной прочности корпусов концевых фрез.

5. Обосновать и определить режимы обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами, обеспечивающие снижение энергетических затрат и ресурсосбережение, отсутствие дефектов продукции, с учетом:

а) обеспечения наиболее эффективного удаления стружки из зоны резания, в результате которого снижается повторное взаимодействие стружки с зубьями концевой фрезы и сокращаются энергетические затраты на обработку;

б) придания концевой фрезе дополнительного движения вдоль режущей кромки, обеспечивающего равномерный износ и полное функционирование лезвия по его длине;

*Объектом исследования* являются режимы резания древесностружечных плит. *Предметом исследования* является процесс открытого цилиндрического фрезерования облицованных ДСтП концевыми фрезами.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Установленная математическая зависимость величины средней толщины стружки от радиуса концевой фрезы, подачи на зуб, снимаемого припуска с учетом полного угла контакта лезвия с обрабатываемым материалом, позволяющая повысить точность расчетов скорости движения подачи, силы и мощности резания до 5%.

2. Разработанная математическая модель для определения максимальных допустимых сил резания по критерию усталостной прочности корпусов концевых фрез, обеспечивающая прогнозирование их работоспособности по данному критерию.

3. Разработанные математические зависимости сил и мощности резания от величин средней толщины стружки, снимаемого припуска, частоты вращения концевой фрезы при обработке облицованных древесностружечных плит, позволяющие устанавливать энерго- и ресурсосберегающие режимы.

4. Режимы обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами с учетом эффективного удаления стружки из зоны резания, придания фрезе дополнительного движения вдоль режущей кромки, обеспечивающие снижение энергетических затрат до 23,6% и ресурсосбережение благодаря отсутствию дефектов продукции.

***Личный вклад соискателя.*** Соискатель принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследований, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных данных, разработке патента, во внедрении результатов в производство и учебный процесс. Все основные результаты, приводимые в диссертационной работе, получены автором лично. Соавторы публикаций участвовали в анализе и выборе методов для решения необходимых задач, а также в обсуждении и оформлении полученных результатов:

***Апробация результатов диссертации.*** Основные положения диссертации представлены и обсуждены на научно-технических конференциях, научных семинарах и выставках: с 69-й по 73-ю научно-технических конференциях (БГТУ, Минск, 2005–2009 гг.), Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безо-

пасные технологии» (БГТУ, Минск, 2005), X Республиканской научной конференции студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь (БГУ, Минск, 2005), VI Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (ГТТУ, Гомель, 2006), II Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (УГЛУ, Екатеринбург, 2007), III Международной научно-технической конференции «Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология» (БНТУ, Минск, 2007), Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (БГТУ, Минск, 2008), Международной научно-технической конференции «Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития» (БГТУ, Минск, 2009), IV Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (УГЛУ, Екатеринбург, 2009), 8-й Международной научно-технической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии», (ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, 2009), Международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов и перспективы их развития» (БГТУ, Минск, 2009).

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе 7 статей объемом 3,59 авторского листа в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК по специальности, 1 статья в зарубежном рецензируемом научно-производственном периодическом издании, 11 статей в сборниках материалов конференций, тезисы 2 докладов, получен 1 патент Республики Беларусь. Общий объем опубликованных материалов составляет 91 страницу.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 197 страниц, включая 49 иллюстраций на 25 страницах, 5 таблиц на 4 страницах и 16 приложений на 77 страницах. Библиографический список содержит 117 наименований на 11 страницах, из них 22 – собственные публикации соискателя.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору литературных источников по теме диссертации: рассмотрены особенности облицованных ДСтП как объекта обработки цилиндрическим фрезерованием, конструкции и специфика эксплуатации концевых фрез.

Изучению процессов фрезерования ДСтП, условий эксплуатации концевых фрез, их прочности и работоспособности при обработке древесных материалов посвящены работы ряда отечественных и зарубежных ученых

(Е.Г. Ивановский, Ю.А. Цуканов, В.В. Амалицкий, В.Н. Позднякова, О.З. Хуа-жев, В.К. Шилько, G. Pahlitzsch, E. Salje и др.). Основное внимание исследователей тех лет уделялось влиянию на силы и мощность резания, качество обработки поверхностей параметров геометрии резцов концевых фрез (передний и задний углы, угол резания) и величины средней толщины стружки (подачи на зуб). Однако эти исследования были проведены на малопроизводительном оборудовании, параметры которого гораздо ниже, по сравнению с характеристиками станков, применяемых в современных условиях. Современные конструкции концевых фрез отличаются от используемых ранее.

В результате анализа информационных источников выявлены вопросы, не разрешенные в предшествующих научных исследованиях, что сокращает эффективность промышленного применения концевых фрез при обработке облицованных ДСтП с позиции энерго- и ресурсосбережения.

Высокие частоты вращения концевых фрез (как правило, до  $18\ 000\ \text{мин}^{-1}$ ), малый диаметр (14–25 мм при обработке ДСтП), консольное расположение в патроне станка, значительные силы, действующие в зоне резания, приводят к аварийным усталостным разрушениям корпусов инструмента. Отсутствие данных о максимальных силах резания, допустимых по критерию усталостной прочности корпусов концевых фрез, не позволяет прогнозировать и предупреждать подобные разрушения.

В связи с большим углом контакта лезвия концевой фрезы с заготовкой и высокой частотой вращения удаление стружки из зоны резания затруднено и является недостаточно полным. Происходит повторное взаимодействие с режущим зубом стружки, уже отделенной от заготовки. Это приводит к дополнительным энергетическим затратам на обработку, сокращает работоспособность инструмента, ухудшает условия эксплуатации оборудования.

Кроме того, особенностью облицованных ДСтП, связанной со спецификой технологии их изготовления, является неравномерность плотности и содержания законденсированного связующего по толщине плиты. Это вызывает неравномерный износ лезвия концевой фрезы и его неполное использование по длине.

Для обеспечения энерго- и ресурсоэффективности обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами на современных высокопроизводительных деревообрабатывающих станках необходимо разработать энерго- и ресурсосберегающие режимы эксплуатации инструмента, что требует проведения комплекса исследований влияния на силу, мощность резания и качество обработанной поверхности таких режимных параметров, как средняя толщина стружки ( $a_{cp}$ , мм), снимаемый припуск на обработку ( $h$ , мм), частота вращения концевой фрезы ( $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ), радиус концевой фрезы ( $R$ , мм), направление подачи (встречная, попутная). Для этого необходимо разработать и реализовать методику проведения экспериментальных исследований.

На основании проведенного анализа информационных источников сформулирована цель диссертационных исследований и задачи для ее реализации.

**Вторая глава** посвящена описанию объектов и методов проведения исследований для изучения влияния параметров режимов обработки облицованных

ДСтП концевыми фрезами на силовые показатели и мощность резания, образование дефектов продукции.

Исследуемыми параметрами режимов обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами явились: средняя толщина стружки ( $a_{ср}$ , мм), снимаемый припуск ( $h$ , мм), частота вращения концевой фрезы ( $n$ , мин<sup>-1</sup>), радиус концевой фрезы ( $R$ , мм), направление подачи (встречная, попутная).

Для экспериментальных исследований влияния параметров режима обработки концевыми фрезами на силу, мощность и образование дефектов продукции необходимо было учесть специфические особенности эксплуатации концевых фрез, такие, как их малые диаметры, высокие частоты вращения, широкий диапазон снимаемых припусков и углов контакта лезвия с обрабатываемым материалом, применение на станках, обеспечивающих высокие скорости движения подачи. В соответствии с вышеизложенным, в первую очередь следовало установить математическую зависимость величины средней толщины стружки  $a_{ср}$  от полного угла контакта лезвия с обрабатываемым материалом (сумма углов входа и выхода лезвия). Далее требовалось определить максимальные силы резания, допустимые при обработке облицованных ДСтП с заданным коэффициентом запаса по критерию усталостной прочности корпусов концевых фрез. Это важно для предотвращения часто происходящих в производственных условиях усталостных разрушений концевых фрез.

На рисунке 1 представлена схема снятия припуска ( $h$ , мм) материала концевой фрезой, вращающейся с циклической частотой ( $\omega$ , рад/с) (скорость резания  $V$ , м/с) и осуществляющей движение подачи со скоростью  $V_s$  (м/мин).

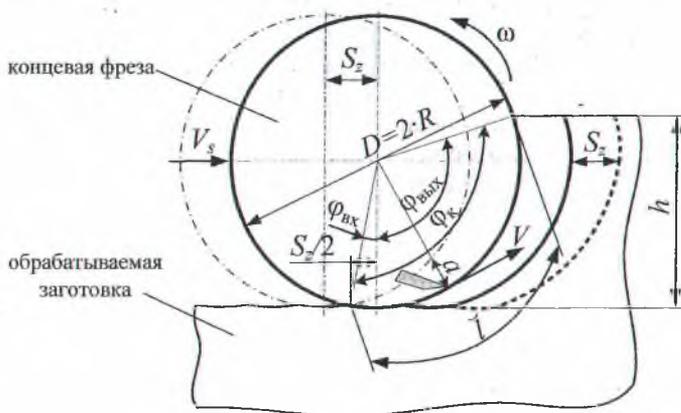


Рисунок 1 – Схема к определению средней толщины стружки ( $a_{ср}$ , мм) на дуге контакта  $\Gamma$  лезвия с обрабатываемым материалом

Как показано на рисунке 1, для концевых фрез (малые радиусы резания ( $R$ , мм) и большие подачи на зуб ( $S_z$ , мм)) величина угла входа лезвия в заготовку ( $\varphi_{вх}$ , град) оказывается значительной. При расчетах мгновенной ( $a$ , мм) и средней ( $a_{ср}$ , мм) толщины стружки следует учитывать полный угол контакта лезвия ( $\varphi_{к}$ , град) с обрабатываемым материалом.

С учетом величины угла входа лезвия в материал  $\varphi_{\text{вх}} = \arcsin \frac{U_z}{2 \cdot R}$  и угла выхода лезвия  $\varphi_{\text{вых}} = \arcsin \frac{R-h}{R}$  из материала уточненная величина средней толщины стружки для случая снятия припуска, равного диаметру ( $D$ , мм) концевой фрезы, может быть определена по разработанному уравнению:

$$a_{\text{ср}}^{h=D} = \frac{180 \cdot S_z}{\pi \cdot \left( \arcsin \frac{S_z}{2 \cdot R} + 90 \right)}; \quad (1)$$

для случая снятия припуска ( $h$ , мм), меньше диаметра концевой фрезы:

$$a_{\text{ср}}^{h<D} = \frac{180 \cdot S_z \cdot h}{\pi \cdot R \cdot \left( \arcsin \frac{S_z}{2 \cdot R} + \arccos \frac{R-h}{R} \right)}. \quad (2)$$

Использование разработанных зависимостей (1) и (2) для расчета средней толщины стружки показало возможность сокращения погрешности в ее определении на 5% благодаря учету полного угла контакта лезвия с обрабатываемым материалом. Это повышает точность расчетов величины скорости движения подачи, зависящей от величины средней толщины стружки. Так, для концевой фрезы диаметром 14 мм, осуществляющей снятие припуска, равного этому диаметру, величине средней толщины стружки 0,61 мм и частоте вращения инструмента  $14\,000 \text{ мин}^{-1}$  соответствует скорость движения подачи, вычисленная с учетом полного угла контакта (с использованием уравнения (1)),  $V_s = 14 \text{ м/мин}$ , а при расчетах, не учитывающих полный угол контакта,  $V_s = 13,4 \text{ м/мин}$ . Данному отличию скоростей подачи соответствует экспериментально установленная разница мощностей резания около 0,1 кВт.

Повышение точности определения средней толщины стружки позволяет повысить точность расчетов силы и мощности резания. При этом важно знать максимальные допустимые значения силы резания для предотвращения усталостных разрушений инструмента.

Применение для учета двухосного напряженного состояния уравнения Гафа – Полларда позволило разработать математическую зависимость максимальной допустимой касательной силы резания, средней за оборот ( $F_{\text{кmax}}$ , Н) при которой концевая фреза осуществляет обработку с заданным коэффициентом запаса  $n_3$  по критерию усталостной прочности корпуса от параметров конструкции и материала концевой фрезы:

$$F_{\text{кmax}} = \frac{\sigma_{-1} \cdot \tau_{-1} \cdot D^3}{n_3 \cdot \sqrt{50 \cdot \left( \frac{k_\tau}{\varepsilon \cdot \beta} + \psi_\tau \right)^2 \cdot \tau_{-1}^2 \cdot L^2 + 6,25 \cdot R^2 \cdot \left( \frac{k_\sigma}{\varepsilon \cdot \beta} + \psi_\sigma \right)^2 \cdot \sigma_{-1}^2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$  – предел выносливости соответственно при изгибе и кручении для симметричного цикла, МПа;  $D$  – диаметр концевой фрезы, мм;  $k_\sigma, k_\tau$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений соответственно при изгибе и кручении;  $\varepsilon$  – масштабный фактор;  $\beta$  – коэффициент влияния состояния поверхности;  $\psi_\sigma, \psi_\tau$  – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла

соответственно для изгиба и кручения;  $L$  – расстояние от уровня крепления хвостовика в цанге до уровня приложения силы резания, мм;  $R$  – радиус концевой фрезы, мм (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Расчетная схема к определению максимальной допустимой касательной силы резания при выбранном коэффициенте запаса по критерию усталостной прочности корпуса концевой фрезы (а) и усталостные разрушения корпусов концевых фрез (б)**

Разработанные уравнения (1), (2) и (3) применялись при проведении экспериментальных исследований.

В структуре экспериментальных исследований в качестве выходных параметров приняты касательная сила резания, средняя на дуге контакта  $F_t$  (Н), средняя за оборот концевой фрезы  $F_k$  (Н), мощность резания  $P$  (кВт).

В связи с тем, что в процессах фрезерования со снятием припусков, меньших и равных диаметру концевой фрезы, условия удаления стружки из зоны резания различны, обоснована необходимость отдельного экспериментального изучения процессов раскроя и обработки по периметру облицованных ДСтП. При этом также отдельного изучения требовали попутная и встречная схемы фрезерования со снятием припуска, меньше диаметра концевой фрезы.

В связи с принятыми в экспериментальных исследованиях широкими, не изученными ранее диапазонами варьирования значений средней толщины стружки и частоты вращения концевой фрезы, используемыми на современном деревообрабатывающем оборудовании, а также с отсутствием информации о характере зависимости сил и мощности резания от принятых переменных факторов осуществлялось двухэтапное исследование закономерностей влияния средней толщины стружки и частоты вращения концевой фрезы одного диаметра на мощность, затрачиваемую на снятие припуска, равного диаметру фрезы (раскрой). На первом этапе исследования осуществлялись на основе однофакторного эксперимента. Переменные исследуемые факторы: средняя толщина стружки  $X_1$  (от 0,1 мм до 1 мм с шагом варьирования 0,1 мм), частота враще-

ния концевой фрезы  $X_2$  (от 4000 мин<sup>-1</sup> до 18 000 мин<sup>-1</sup> с шагом варьирования 2000 мин<sup>-1</sup>). Применялась сборная одноножевая концевая фреза диаметром 21 мм.

Второй этап экспериментальных исследований раскроя облицованных ДСтП концевыми фрезами реализовывался с применением двухфакторного математического планирования (план  $B_2$ ) для учета парных взаимодействий переменных факторов: средняя толщина стружки  $X_1$  (от 0,1 мм до 1 мм с интервалом варьирования 0,45 мм), частота вращения концевой фрезы  $X_2$  (от 4000 мин<sup>-1</sup> до 18 000 мин<sup>-1</sup> с интервалом варьирования 7000 мин<sup>-1</sup>). Проведение исследования двумя способами повысило достоверность результатов.

Исследования встречного фрезерования с удалением припуска меньше диаметра концевой фрезы осуществлялись с использованием плана  $B_3$  математического планирования эксперимента. Переменные факторы: средняя толщина стружки  $X_1$  (от 0,05 мм до 0,65 мм с интервалом варьирования 0,3 мм), снимаемый припуск  $X_2$  (от 2 мм до величины радиуса используемой концевой фрезы  $R$  с интервалом варьирования  $(R+2)/2$ ); частота вращения концевой фрезы  $X_3$  (от 10 000 мин<sup>-1</sup> до 18 000 мин<sup>-1</sup> с интервалом варьирования 4000 мин<sup>-1</sup>). С целью установления влияния диаметра фрезерования на выходные параметры процесса резания исследования осуществлялись с использованием сборных одноножевых концевых фрез трех диаметров: 14 мм, 21 мм и 25 мм.

Для установления влияния направления подачи на мощность резания и образование дефектов продукции сравнивалась мощность резания при раскрое облицованной ДСтП концевой фрезой с мощностями резания при встречном и попутном фрезеровании со снятием припуска, равного радиусу фрезы.

Эксперименты проводились на ДСтП толщиной 25 мм, средней плотностью 650 кг/м<sup>3</sup>, с двусторонней отделкой. В ходе экспериментов контролировалось состояние обработанной поверхности: фиксировалось появление дефектов продукции – сколов отделки плиты сверху и снизу.

Для проведения экспериментов использовались современные деревообрабатывающий станок модели ROVER В 4.35 с числовым программным управлением (ЧПУ); измерительная система, содержащая динамометр УДМ 1200; вторичный преобразователь FX-UT10 ф. Sony (Япония), персональный компьютер. Обработка экспериментально полученных данных осуществлялась с использованием цифрового запоминающего осциллографа ТЕКТРОНИХ TDS 2024В (США).

Разработанные методика и структура проведения экспериментальных исследований позволили с высокой степенью точности получать данные о влиянии исследуемых факторов на силу, мощность резания и качество обработанной поверхности, анализировать результаты и разрабатывать практические рекомендации по повышению эффективности процесса обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния на силу, мощность резания и качество обработанной поверхности облицованных ДСтП таких режимных параметров, как средняя толщина стружки ( $a_{cp}$ , мм), снимаемый припуск ( $h$ , мм), частота вращения концевой фре-

зы ( $n$ , мин<sup>-1</sup>) для различных радиусов концевой фрезы ( $R$ , мм) и направлений подачи (встречная, попутная).

Процесс фрезерования со снятием припуска, равного диаметру концевой фрезы, исследовался в два этапа. Незначительное отличие данных, полученных в результате реализации однофакторного эксперимента (первый этап) и двухфакторного математического планирования (второй этап), отсутствие резких скачков, точек перегиба и нескольких экстремумов исследуемых зависимостей мощности резания от средней толщины стружки и частоты вращения концевой фрезы, необходимость учета парных взаимодействий исследуемых переменных факторов позволили сделать вывод о рациональности применения для эксперимента методов математического планирования.

Реализация методической сетки опытов второго этапа позволила получить данные для разработки модели влияния средней толщины стружки ( $a_{cp}$ , мм) и частоты вращения концевой фрезы ( $n$ , мин<sup>-1</sup>) на мощность резания  $P$  (кВт) при фрезеровании облицованных ДСтП со снятием припуска, равного диаметру концевой фрезы:

$$P = 0,1994 + 0,8099 \cdot a_{cp}^2 + 1,428 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1,0747 \cdot a_{cp} - 3,2 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0,000185 \cdot a_{cp} \cdot n. \quad (4)$$

Исследования встречного фрезерования с удалением припуска, меньше диаметра концевой фрезы, осуществлялись с применением трехфакторного математического планирования (план  $B_3$ ). Реализация методической сетки опытов плана  $B_3$  позволила разработать отдельно для трех используемых в эксперименте диаметров концевой фрезы (14 мм, 21 мм, 25 мм) математические модели, описывающие влияние средней толщины стружки ( $a_{cp}$ , мм), снимаемого припуска ( $h$ , мм), частоты вращения концевой фрезы ( $n$ , мин<sup>-1</sup>) на выходные показатели: касательную силу резания, среднюю на дуге контакта  $F_t$  (Н), касательную силу резания, среднюю за оборот концевой фрезы  $F_k$  (Н), и мощность резания  $P$  (кВт). На основании сопоставления полученных математических моделей, малых отличий рассчитанных на их основе величин сил и мощности резания, сделан вывод об отсутствии влияния диаметра концевой фрезы на указанные выходные показатели в исследуемых диапазонах переменных факторов.

В результате экспериментальных исследований по встречному и попутному фрезерованию при снятии припусков, равных радиусу концевой фрезы, и раскрое ДСтП выявлено отсутствие влияния на силовые показатели и мощность резания при обработке облицованных ДСтП концевыми фрезами направления подачи в рассматриваемых диапазонах переменных факторов. Это позволило разработать обобщенные модели, описывающие процесс обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами диаметром от 14 мм до 25 мм при встречной и попутной подачах.

Касательная сила резания, средняя на дуге контакта, Н:

$$F_t = 132,5255 - 433,33 \cdot a_{cp}^2 + 6,4375 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 369,892 \cdot a_{cp} - 5,2627 \cdot h - 0,017695 \cdot n + 7,13725 \cdot a_{cp} \cdot h + 0,0110833 \cdot a_{cp} \cdot n + 0,000571 \cdot h \cdot n; \quad (5)$$

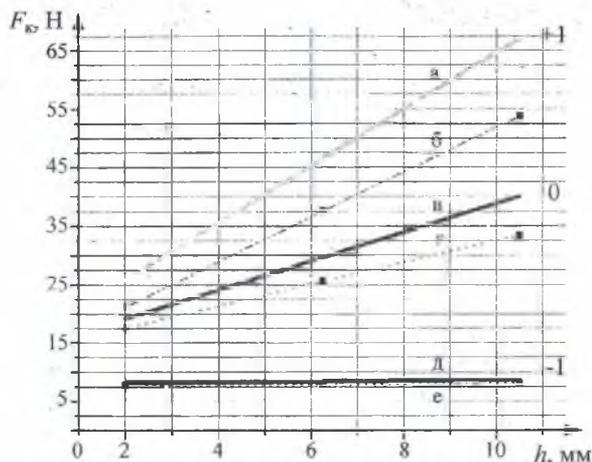
Касательная сила резания, средняя за оборот концевой фрезы, Н:

$$F_k = 30,468 - 71,1 \cdot a_{cp}^2 + 1,1875 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 38,405 \cdot a_{cp} - 1,9686 \cdot h - 0,00389 \cdot n + 5,0196 \cdot a_{cp} \cdot h + 0,00183 \cdot a_{cp} \cdot n + 0,0002118 \cdot h \cdot n; \quad (6)$$

Мощность резания, кВт:

$$P = 0,791 - 0,989 \cdot a_{cp}^2 + 3,0625 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 0,1199 \cdot a_{cp} - 0,067 \cdot h - 0,00010313 \cdot n + 0,07608 \cdot a_{cp} \cdot h + 0,0000733 \cdot a_{cp} \cdot n + 0,00000623 \cdot h \cdot n. \quad (7)$$

Анализ уравнения (6) показал, что при увеличении припуска на обработку касательная сила резания, средняя за оборот, увеличивается на трех уровнях варьирования средней толщины стружки и частоты вращения концевой фрезы (рисунок 3).



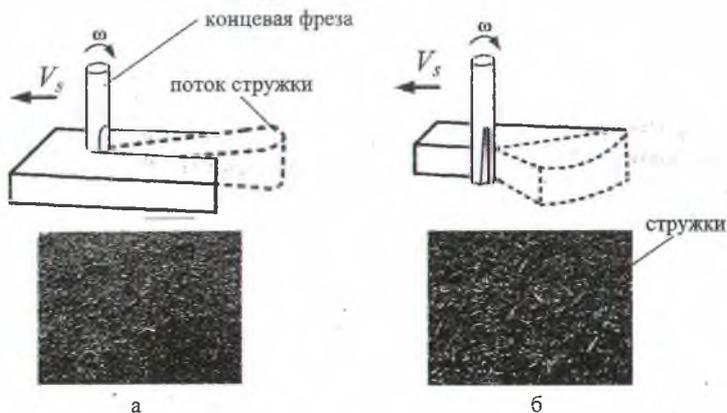
а, в, д — графики зависимости касательной силы резания, средней за оборот концевой фрезы, при использовании вытяжного устройства, распространенной конструкции;  
б, г, е — то же в условиях воздушного потока, направленного через зону резания

**Рисунок 3 — Зависимость касательной силы резания, средней за оборот концевой фрезы ( $F_k$ , Н), от величины снимаемого припуска ( $h$ , мм) при варьировании средней толщины стружки ( $a_{cp}$ , мм) и частоты вращения фрезы ( $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ) на нижнем (-1), основном (0) и верхнем (+1) уровнях**

Подобная закономерность позволяет выявить вклад в рост сил резания явления повторного взаимодействия стружки с ножом, в связи с ее недостаточно эффективным удалением из зоны резания. В условиях ограниченного пространства и высокой частоты вращения фрезы, стружка, однократно срезанная ножом, повторно с ним взаимодействует и доизмельчается (рисунок 4), что приводит к повышению энергопотребления, сокращает ресурс инструмента и оборудования, ухудшает условия труда.

Контроль качества обработанной поверхности позволил установить, что образование дефектов продукции в виде сколов отделки плиты наблюдается

при средней толщине стружки  $a_{cp} > 0,38$  мм.



а – раскрой материала; б – снятие припуска, меньше диаметра концевой фрезы

**Рисунок 4 – Влияние вида обработки облицованных ДСтП на степень измельчения стружки**

На основании уравнения (7) с учетом времени, затрачиваемого на обработку 1 м плиты, установлены режимы с минимальной энергоемкостью. Для случая снятия припуска, меньше диаметра фрезы, в интервале средних толщин стружки от 0,05 мм до 0,38 мм минимальной энергоемкостью характеризуется процесс бездефектной обработки  $a_{cp} = 0,38$  мм,  $h = 2$  мм,  $n = 13\ 110$  мин<sup>-1</sup>. Для случая раскроя минимальная энергоемкость процесса фрезерования достигается при  $a_{cp} = 0,38$  мм,  $n = 4000$  мин<sup>-1</sup>.

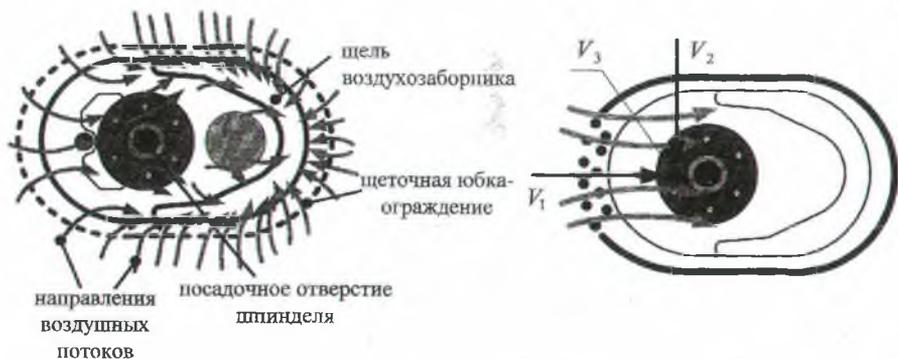
Выполненные экспериментальные исследования показывают, что для повышения эффективности процесса обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами следует увеличить полноту удаления стружки из зоны резания.

**Четвертая глава** посвящена разработке способа повышения эффективности удаления стружки из зоны резания.

Экспериментальные исследования воздушных потоков, действующих в вытяжном устройстве распространенной конструкции (обрабатывающий центр с ЧПУ ROVER В 4.35), позволили установить их слабоорганизованный характер (рисунок 5, а). Отсутствие четкой направленности воздушных потоков отрицательно сказывается на эффективности стружкоудаления.

Благодаря организации в вытяжном устройстве воздушных потоков, направленных через зону резания, их скорость возросла в трех взаимно перпендикулярных направлениях от 1,5 до 8 раз без увеличения мощности привода вентилятора (рисунок 5, б).

При этом установлено, что интенсивность роста средней касательной силы резания за оборот концевой фрезы при увеличении припуска на обработку значительно понизилась (рисунок 3, пунктирные линии), что говорит о сокращении эффекта повторного взаимодействия стружки с ножом фрезы.



а

б

$V_1$  – скорость горизонтального продольного воздушного потока;

$V_2$  – скорость горизонтального поперечного воздушного потока;

$V_3$  – скорость вертикального воздушного потока

**Рисунок 5 – Слабоорганизованные воздушные потоки в вытяжном устройстве распространенной конструкции (а) и организация воздушных потоков через зону резания в предлагаемом вытяжном устройстве (Патент 5413 РБ) с указанием направлений измерения их скоростей (б)**

Касательная сила резания, средняя за оборот, при снятии припуска, меньше диаметра концевой фрезы, в результате применения запатентованного вытяжного устройства с направлением воздушных потоков через зону резания (рисунок 5, б) уменьшилась: на нижнем уровне варьирования переменных факторов в среднем на 6,8%, на основном уровне варьирования – на 16,6%, на верхнем уровне варьирования – на 23,6%.

При раскросе облицованной ДСтП уменьшение касательной силы резания, средней за оборот концевой фрезы составило: на нижнем уровне – на 11,2%, на основном уровне – на 7,1%, на верхнем уровне – на 4,2%.

Однако, по мере потери работоспособности ножей, энергетические затраты растут, появляются дефекты обработки, и поэтому для резания следует применять острые области неравномерно изношенного по длине лезвия.

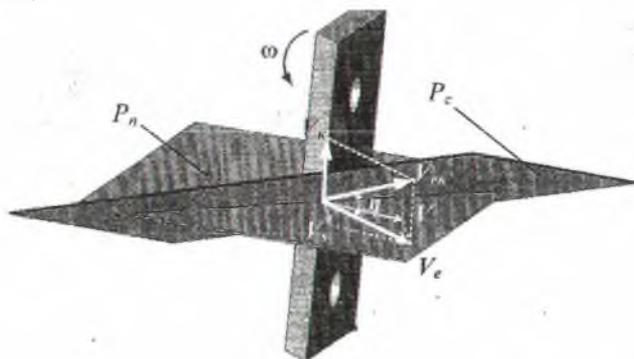
Для повышения эффективности обработки облицованных ДСтП концевыми фрезами следует повысить равномерность износа лезвий, что достигается применением разработанного способа фрезерования с осцилляцией.

**Пятая глава** посвящена разработке и опытно-промышленной апробации способа фрезерования с дополнительным движением вдоль режущей кромки лезвия (резание с осцилляцией), благодаря которому повышается равномерность износа лезвия и сокращаются энергетические затраты на резание при обработке облицованных ДСтП.

Для реализации данного способа резания концевой фрезе помимо скорости главного движения  $V$  и скорости движения подачи  $V_f$ , сообщается скорость касательного движения  $V_c$  по гармоническому закону вдоль режущей кромки лезвия.

В процессе фрезерования с осцилляцией уменьшается потребляемая мощ-

ность резания и обеспечивается повышенной работоспособностью фрезы до возникновения сколов отделки. Это обусловлено появлением угла скорости резания  $\eta$  (рисунок 6).



$P_n$  – плоскость резания;  $P_c$  – плоскость схода стружки;  
 $V_k$  – скорость касательного движения;  
 $V_{ек}$  – скорость результирующего касательного движения;  
 $V$  – скорость резания;  $V_e$  – скорость результирующего движения резания;  
 $V_s$  – скорость движения подачи;  $\eta$  – угол скорости резания;

**Рисунок 6 – Схема векторов скоростей вращающейся концевой фрезы с дополнительным движением вдоль режущей кромки**

Согласно разработанному уравнению, величина угла скорости резания  $\eta$  возрастает при увеличении амплитуды осцилляции и числа двойных ходов инструмента в минуту.

На этой основе разработан режим фрезерования с осцилляцией применительно к конкретному функционирующему оборудованию – деревообрабатывающему станку модели ВАССИ Master, эксплуатируемому на ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев»». Данный станок обеспечивает вертикальные перемещения концевой фрезы с числом двойных ходов в минуту от 0 до 96. Возможная амплитуда осцилляции от 0 до 29 мм.

В результате проведения опытно-промышленных испытаний на ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев»» при обработке ДСтП толщиной 16 мм со скоростью движения подачи 4 м/мин, при частоте вращения концевой фрезы 12 000 мин<sup>-1</sup> установлено, что сообщение концевой фрезе осциллирующего движения обеспечивает равномерный износ лезвия ножа. С ростом амплитуды осцилляции от 0 до 29 мм и числа двойных ходов в минуту от 0 до 96 энергетические затраты на процесс обработки сокращаются до 15% при обеспечении качества обработанной поверхности.

Аналогичные результаты могут быть получены при проведении испытаний разработанного способа фрезерования с дополнительным движением вдоль режущей кромки лезвия на других деревообрабатывающих предприятиях, выпускающих продукцию из ДСтП и применяющих оборудование с возможностью задания в процессе резания перемещений фрезы по вертикали.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Установлена математическая зависимость величины средней толщины стружки от радиуса концевой фрезы, подачи на зуб, снимаемого припуска с учетом полного угла контакта лезвия с обрабатываемым материалом, позволяющая повысить точность расчетов скорости движения подачи, силы и мощности резания до 5% [1, 8, 9, 20].

2. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать максимальные силы резания, допустимые при обработке облицованных древесностружечных плит с заданным коэффициентом запаса по критерию усталостной прочности корпусов концевых фрез. Расчет максимальных допустимых сил резания обеспечивает возможность прогнозирования и предотвращения усталостных разрушений концевых фрез, повышает эффективность их применения.

Пределы работоспособности корпусов концевых фрез различных диаметров при коэффициенте запаса  $n_3 = 3$ :

Ø 14 мм :  $F_{\text{кmax}} = 389$  Н; Ø 21 мм :  $F_{\text{кmax}} = 1310$  Н; Ø 25 мм :  $F_{\text{кmax}} = 2208$  Н [2, 10, 11].

3. Разработаны математические зависимости сил и мощности резания от величин средней толщины стружки, снимаемого припуска, частоты вращения концевой фрезы при обработке облицованных древесностружечных плит, позволяющие установить энерго- и ресурсосберегающие режимы:

для процесса фрезерования со снятием припуска, меньше диаметра фрезы:

$a_{\text{ср}} = 0,38$  мм;  $h = 2$  мм;  $n = 13\ 110$  мин<sup>-1</sup>;

для процесса фрезерования со снятием припуска, равного диаметру фрезы:

$a_{\text{ср}} = 0,38$  мм;  $n = 4000$  мин<sup>-1</sup>.

Качество поверхности облицованных ДСтП при обработке концевыми фрезами обеспечивают режимы резания с величиной средней толщины стружки не более 0,38 мм. На режимах с большей величиной средней толщины стружки процесс обработки характеризуется появлением сколов отделки [3, 5, 7, 12, 14, 15, 21].

4. На основе анализа зависимости средней касательной силы резания от припуска на обработку для разных частот вращения концевой фрезы установлено, что значительное влияние на работоспособность концевых фрез оказывает повторное взаимодействие срезанной стружки с ножом, что можно уменьшить при эффективном удалении отходов из зоны резания.

Скорости воздушных потоков  $V_1, V_2, V_3$  в зоне резания и их направления (рисунок 5), обеспечивающие снижение энергетических затрат на резание до 11,2% при снятии припуска, равного диаметру концевой фрезы:  $V_1 = 20$  м/с;  $V_2 = 11$  м/с;  $V_3 = 14$  м/с; при снятии припуска, меньше диаметра концевой фрезы – до 23,6%:  $V_1 = 20$  м/с;  $V_2 = 4$  м/с (со стороны, снизу не ограниченной заготовкой),  $V_2 = 8,5$  м/с (со стороны, снизу ограниченной заготовкой);  $V_3 = 11$  м/с.

На основе проведенных исследований предложены новые конструкции вытяжного устройства (Патент 5413 РБ) и концевых фрез [4, 6, 13, 17, 22].

5. Разработан способ обработки облицованных ДСтП, обеспечивающий равномерный износ ножей, и, соответственно, больший процент использования их материала. Концевой фрезе помимо вращательного и поступательного движений сообщается дополнительное движение – касательное движение вдоль режущей кромки поочередно вверх и вниз.

Проведенные на ЗАО «Холдинговая компания “Пинскдрев”» опытно-промышленные испытания концевых фрез при их эксплуатации с дополнительным движением вдоль режущей кромки и внедрение в технологический процесс рациональных режимов данного резания (число двойных ходов инструмента в минуту:  $N_{д.х} = 96$ ; амплитуда осцилляции:  $z_{ос} = 29$  мм) обеспечили равномерный износ резцов, позволили сократить энергетические затраты на процесс обработки до 15%, повысить качество обработанной поверхности за счет отсутствия микроразрушений лицевых видимых поверхностей, повысить стойкость резцов на 20% [16, 17, 18, 19].

### ***Рекомендации по практическому использованию результатов***

1. Результаты диссертационной работы использованы для повышения эффективности обработки ДСтП концевыми фрезами на ЗАО «Холдинговая компания “Пинскдрев”».

Выполненные расчеты технико-экономических показателей применительно к ЗАО «Холдинговая компания “Пинскдрев”» свидетельствуют об экономической эффективности использования фрезерования с осцилляцией. За счет снижения текущих затрат на режущий инструмент, электрическую энергию при обеспечении требуемого качества продукции достигается годовой экономический эффект в размере 16 800 тыс. руб. (в ценах 2007 года).

2. Разработанные математическая модель расчета средней толщины стружки, учитывающая значения углов входа и выхода лезвия; математические зависимости для расчета силы резания при обработке облицованных ДСтП концевыми фрезами; математическая модель для прогнозирования предельной работоспособности концевых фрез внедрены в учебный процесс на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов УО «Белорусский государственный технологический университет» по дисциплинам «Резание древесины и дерево-режущий инструмент», «Проектирование и производство дерево-режущего инструмента и заточного оборудования» учебного плана специальности 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса».

3. Разработанная в составе диссертационных исследований математическая модель, регламентирующая пределы работоспособности корпусов концевых фрез, рекомендована для использования на производствах для предупреждения аварийного усталостного разрушения инструмента, что повышает экономическую эффективность его использования.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

### ***Статьи в научных журналах и сборниках***

1. Клубков, А.П. Теоретические представления о процессе излома кончика лезвия резца в начальный период работы / А.П. Клубков, С.С. Макаревич,

П.В. Рудак // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2005. – Вып. XIII. – С. 160–162.

2. Рудак, П.В. Работоспособность концевой фрезерного инструмента по критерию усталостной прочности / П.В. Рудак, С.А. Гриневич // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2006. – Вып. XIV. – С. 175–177.

3. Рудак, П.В. Проникание режущего элемента концевой фрезы при обработке древесных материалов / П.В. Рудак // Труды БГТУ, Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 247–250.

4. Рудак, П.В. Эксплуатационные возможности повышения стойкости концевого фрезерного инструмента при обработке плитных древесных материалов / П.В. Рудак, А.П. Фридрих // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 215–221.

5. Рудак, П.В. Методика экспериментальных исследований процесса резания плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак, А.П. Фридрих, И.И. Бавбель // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 195–200.

6. Фридрих, А.П. Повышение эффективности при эксплуатации деревообрабатывающих центров / А.П. Фридрих, П.В. Рудак // Дизайн и производство мебели. – 2008. – № 4(21). – С. 36–39.

7. Рудак, П.В. Силовые показатели процесса обработки плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 301–305.

8. Рудак, П.В. Стойкость режущих элементов концевого фрезерного инструмента при обработке плитных древесных материалов / П.В. Рудак // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 306–310.

### *Материалы конференций*

9. Рудак, П.В. Исследование процесса обработки кромок плитных материалов концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак, Д.Л. Шукевич // Ресурсы и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2005 г.: в 2 ч. / Беларус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – Ч.2. – С. 315–318.

10. Рудак, П.В. Влияние затупления резцов концевого фрезерного инструмента на коэффициент запаса по критерию усталостной прочности тела фрезы / П.В. Рудак, С.А. Гриневич // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы VI Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 4–5 мая 2006 г. / Гсмел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2006. – С. 132–136.

11. Рудак, П.В. Влияние состояния режущей кромки концевого фрезерного инструмента на коэффициент запаса по критерию усталостной прочности / П.В. Рудак, С.А. Гриневич // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды II Междунар. евраз. симпоз., Екатеринбург, 2–5 окт.

1365 ар

БІБЛІЯТЭКА  
17 Беларускага дзяржаўнага  
тэхналагічнага ўніверсітэта

2007 г. / Урал. гос. лесотехн. ун-т; под ред. В.Г. Новоселова. – Екатеринбург, 2007. – С. 238–242.

12. Гришкевич, А.А. Повышение ресурса дереворежущего инструмента с помощью упрочняющих технологий при обработке плитных материалов / А.А. Гришкевич, В.В. Чаевский, П.В. Рудак, В.В. Углов, А.К. Кулешов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 нояб. 2008 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 237–241.

13. Рудак, П.В. Повышение эффективности обработки кромок плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом с позиции системного подхода к процессу резания / П.В. Рудак // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 нояб. 2008 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 245–249.

14. Рудак, П.В. Экспериментальные исследования процесса резания плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 нояб. 2008 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 260–264.

15. Рудак, П.В. Исследования факторов, влияющих на силы резания при обработке плитных древесных материалов концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак, А.А. Гришкевич, А.П. Фридрих // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 нояб. 2008 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – Ч. 2. – С. 357–360.

16. Рудак, П.В. Современный концевой фрезерный инструмент для обработки плитных древесных материалов / П.В. Рудак // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2009 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2009. – С. 140–141.

17. Рудак, П.В. Эффективная эксплуатация концевого фрезерного инструмента при обработке плитных древесных материалов / П.В. Рудак // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2009 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2009. – С. 145–146.

18. Рудак, П.В. Силовые показатели процесса обработки древесностружечных плит осциллирующим концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды IV Междунар. евраз. симпоз., Екатеринбург, 2–5 окт. 2009 г. / Урал. гос. лесотехн. ун-т; под ред. В.Г. Новоселова. – Екатеринбург, 2009. – С. 329–335.

19. Рудак, П.В. Новые конструкции импортозамещающего концевое фрезерного инструмента для обработки плитных древесных материалов / П.В. Рудак // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов и перспективы их развития: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 нояб. 2009 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2009. – Ч. 2. – С. 212–216.

#### *Тезисы докладов*

20. Рудак, П.В. Особенности процесса обработки плитных материалов концевым фрезерным инструментом / П.В. Рудак, А.А. Гришкевич // НИРС-2005: материалы X респ. науч. конф. студентов и аспирантов высш. учеб. завед. Респ. Беларусь, Минск, 14–16 фев. 2005 г.: в 3 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: А.Г. Захаров [и др.]. – Минск, 2006. – Ч.2. – С. 35.

21. Поболь, И.Л. Упрочняющие покрытия для деревообрабатывающего инструмента / И.Л. Поболь, П.В. Рудак // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 29–30 окт. 2009 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: А.И. Свириденко (отв. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2009. – С. 90–91.

#### *Патенты*

22. Вытяжное устройство обрабатывающего центра: пат. 5413 Респ. Беларусь, МПК В 27 С 9/00 / П.В. Рудак, О.Г. Рудак, А.А. Гришкевич; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № и 20090004; заявл. 05.01.2009; опубл. 30.09.2009 //Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 196.

## РЕЗЮМЕ

Рудак Павел Викторович

Энерго- и ресурсосберегающие режимы обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами

**Ключевые слова:** концевая фреза, облицованные древесностружечные плиты, толщина стружки, режимные параметры, силы резания, качество обработки плит, предельная работоспособность фрез, резание с осцилляцией.

**Объект исследований** – режимы резания древесностружечных плит.

**Предмет исследований** – процесс открытого цилиндрического фрезерования облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами.

**Цель работы** – научное обоснование и разработка режимов обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами с достижением эффекта энерго- и ресурсосбережения.

**Методы исследований и аппаратура.** Для планирования эксперимента использовались *B*-планы второго и третьего порядков. При проведении эксперимента, регистрации и обработке полученных результатов использовались: экспериментальная установка для исследований процессов резания древесины и древесных материалов на базе современного деревообрабатывающего станка с ЧПУ Rover B 4.35 ф. BIESSE (Италия); динамометрический мост УДМ-1200; силоизмерительная система EX-UT10 ф. Sony (Япония), подключенная к персональному компьютеру; динамометр образцовый универсальный ДОУ-3-1 кН, цифровой записывающий осциллограф ТЕКТРОНИХ TDS 2024В (США), электронный анемометр Testo 450 (Германия).

**Научная новизна полученных результатов.** На основе установленного влияния значимых режимных параметров процесса обработки облицованных древесностружечных плит концевыми фрезами на силы и мощность резания разработаны энерго- и ресурсосберегающие режимы с учетом эффективного удаления стружки из зоны фрезерования, придания фрезе дополнительного движения вдоль режущей кромки и обеспечения ее надежности по критерию усталостной прочности.

Разработаны математические зависимости: величины средней толщины срезаемой стружки от радиуса концевой фрезы, подачи на зуб, снимаемого припуска с учетом полного угла контакта лезвия с обрабатываемым материалом; максимальных допустимых сил резания по критерию усталостной прочности корпусов концевых фрез от параметров их материала и конструкции; величин сил и мощности резания от средней толщины стружки, снимаемого припуска, частоты вращения концевой фрезы при обработке облицованных древесностружечных плит.

**Область применения результатов диссертации** – деревообрабатывающие производства, осуществляющие обработку древесностружечных плит концевыми фрезами; машиностроительные предприятия, разрабатывающие и выпускающие концевые фрезы.

## РЭЗІЮМ

Рудак Павел Віктаравіч

Энерга- і рэсурсазберагальныя рэжымы апрацоўкі абліцаваных драўнянастружковых пліт канцавымі фрэзамі

**Ключавыя словы:** канцавыя фрэзы, абліцаванья драўнянастружковыя пліты, таўшчыня стружкі, рэжымныя параметры, сілы рэзаньня, якасьць апрацоўкі пліт, гранічная працаздольнасьць фрэзы, рэзанне з асцыляцыяй.

**Аб’ект даследаванняў** – рэжымы рэзаньня драўнянастружковых пліт.

**Прадмет даследаванняў** – працэс адкрытага цыліндрычнага фрэзеравання абліцаваных драўнянастружковых пліт канцавымі фрэзамі.

**Мэта работы** – навуковае абгрунтаванне і распрацоўка рэжымаў апрацоўкі абліцаваных драўнянастружковых пліт канцавымі фрэзамі з дасягненнем эфекту энерга- і рэсурсазберажэння.

**Метады даследавання і апаратура:** для планавання эксперыменту выкарыстоўваліся В-планы другога і трэцяга парадкаў. Пры правядзенні эксперыменту, рэгістрацыі і апрацоўцы атрыманых вынікаў выкарыстоўваліся: эксперыментальная ўстаноўка для даследаванняў працэсаў рэзаньня драўніны і драўняных матэрыялаў на базе сучаснага дрэваапрацоўчага станка з ЛПК Rover B 4.35 ф. BIESSE (Італія); дынамаметрычны мост УДМ-1200; сілавымяральная сістэма EX-UT10 ф. Sony (Японія), падключаная да персаналізаванага камп’ютэра; дынамометр узорны універсальны ДДУ-3-1 кН, лічбавы запамінальны асцыляграф ТЕКТРОНІХ TDS 2024В (ЗША), электронны анемометр Testo 450 (Германія).

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў.** На падставе ўстаноўленага ўплыву значных рэжымных параметраў працэсу апрацоўкі абліцаваных драўнянастружковых пліт канцавымі фрэзамі на сілы і магутнасць рэзаньня распрацаваны энерга- і рэсурсазберагальныя рэжымы з улікам эфектыўнага выдалення стружкі з зоны фрэзеравання, надання фрэзе дадатковага руху ўздоўж рэзальнага канта і забеспячэння яе надзейнасці па крытэрыю стомленаснай трываласці.

Распрацаваны матэматычныя залежнасці: велічыні сярэдняй таўшчыні зраземай стружкі ад радыуса канцавой фрэзы, падачы на зуб, здымаемага прыпуску з улікам поўнага вугла кантакту ляз з апрацоўваемым матэрыялам; максімальных дапушчальных сілаў рэзаньня па крытэрыю стомленаснай трываласці карпусоў канцавых фрэз ад параметраў іх матэрыялу і канструкцыі; вялічынь сілаў і магутнасці рэзаньня ад сярэдняй таўшчыні стружкі, здымаемага прыпуску, часціні кручэння канцавой фрэзы пры апрацоўцы абліцаваных драўнянастружковых пліт.

**Галіна ўжывання вынікаў дысертацыі** – дрэваапрацоўчыя вытворчасці, якія ажыццяўляюць апрацоўку драўнянастружковых пліт канцавымі фрэзамі; машынабудаўнічыя прадпрыемствы, якія распрацоўваюць і выпускаюць канцавыя фрэзы.

## SUMMARY

**Rudak Pavel Viktorovich**

Energy - and resource saving modes of processing edged wood particle boards by trailer mills

**Keywords:** a trailer mill, edged wood particle boards, thickness of shavings, mode parameters, cutting powers, quality of plates processing, limited working capacity of mills, cutting with oscillation.

**Object of the research** – modes of cutting wood particle boards.

**Subject of the research** – the process of an open peripheral milling of edged wood particle boards by trailer mills.

**The purpose of the research** – working out and scientific substantiation of the modes of processing edged wood particle boards by trailer mills with the aim of effect achieving energy - and resource saving effect.

**Methods of the research and the equipment used.** For experiment planning *B*-plans of the second and third usages were used. During the experiment, registration and processing of the received results they following equipment was used: the experimental machine-tool for investigating their cutting actions of wood and wood-base materials on the basis of a modern woodworking machine with numerical control Rover B 4.35 BIESSE (Italy); dynamometer bridge УДМ -1200; power measuring system EX-UT10 Sony (Japan) connected to the personal computer; a dynamometer exemplary universal ДЮУ-3-1 кН, digital memory oscillograph TEKTRONIX TDS 2024B (USA), electronic wind gauge Testo 450 (Germany).

**Scientific novelty of the gained results.** On the basis of content influence of significant mode parameters of the processing of edged wood particle boards by trailer mills on the force and capacity of the cutting process energy - and resource saving modes including effective removal of shavings from a zone of milling and giving to the mill an additional movement along a cutting edge and maintenance of its reliability by criterion of a fatigue resistance are developed.

Mathematical dependences are developed: rates of an average thickness of cut off shavings from radius of a trailer mill, feeding on a tooth, a removed allowance with a complete angle of contact of an edge with a treated material; the maximum admissible cutting powers by criterion of a fatigue resistance of cases of trailer mills from parameters of their material and design; rates of forces and capacity of cutting from an average thickness of the shavings, a removed allowance, revolutions per minute of a trailer mill during the processing of the edged wood particle boards.

**Field of the application of the dissertation results** - woodshop enterprises conducting the processing of wood particle boards by trailer mills; machine-building enterprises developing and producing trailer mills.

Научное издание

Рудак Павел Викторович

**ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ  
ОБЛИЦОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ КОНЦЕВЫМИ  
ФРЕЗАМИ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.21.05 – древесиноведение, технология  
и оборудование деревообработки

Ответственный за выпуск П.В. Рудак

Подписано в печать 15.03.2010. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,4.  
Тираж 60 экз. Заказ **92**.

Отпечатано в Центре издательско-полиграфических  
и информационных технологий учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».

220006, Минск, Свердлова, 13а.

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.