

УДК 621.914:674:004

**В. В. Раповец<sup>1</sup>, И. К. Клепацкий<sup>1</sup>, С. В. Медведев<sup>2</sup>, Г. Г. Иванец<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ**

Разработана методика проведения вычислительных экспериментов для выявления зависимостей характеристик процесса резания от высокоскоростных режимов обработки материала, включающая генерацию рядов конечно-элементных моделей с различными значениями радиуса округления режущей кромки при вершине дереворежущего ножа. Сгенерирована модель ножа фрезы с радиусом при вершине 5 мкм. Для каждого типоразмера ножа выполнено масштабирование его модели для обеспечения одинаковых исходных условий резания ножами. После масштабирования и переноса модели ножа с новым значением радиуса при вершине выполнены вычислительные эксперименты процесса резания древесины. В разработанную конечно-элементную модель процесса резания добавлены карты назначения граничных условий: фиксации нижнего ряда узлов обрабатываемого материала, продольного движения режущего инструмента, имитирующего подачу с заданной скоростью, вращения ножей фрезы с заданной частотой, приложения боковых давлений и задания свойств материалов.

Предложенная к использованию методика позволяет установить влияние радиуса округления режущей кромки ножа на составляющие силы резания путем сопоставления графиков усилий резания для различных конечно-элементных моделей, а также предварительно созданных напряжений. Вычислительные расчеты на суперкомпьютере позволили разработать базу оптимальных режимов резания при обработке различных древесных материалов, что является основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов при определении значимых выходных параметров для деревообрабатывающих предприятий республики.

**Ключевые слова:** методика, вычислительные эксперименты, модель фрезы, высокоскоростное резание, древесный материал, режимы обработки.

**V. V. Rapovets<sup>1</sup>, I. K. Klepatskiy<sup>1</sup>, S. V. Medvedev<sup>2</sup>, G. G. Ivanets<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus**COMPUTATIONAL EXPERIMENTS OF HIGH-SPEED PROCESSING OF WOOD**

The method of computing experiments to identify the characteristics of the process of cutting dependency on high-speed modes of material processing, including the generation of rows of finite element models with different values of the radius of the rounding of the cutting edge at the top of the wood-cutter. The model of cutter knife with a radius of 5 mm at the top was generated. For each size of the knife blade was made scaling to ensure the same initial conditions of the cutting knives. After scaling and transferring of blade model with the new radius value at the top of the computational experiments of wood cutting process was carried. The developed finite element model of the cutting process added a card to the boundary conditions of the lower row of fixing assemblies of the processed material, the longitudinal motion of the cutting tool feed simulating a predetermined speed of rotation of the cutter blades having a predetermined frequency, and application of lateral pressure reference material properties.

The proposed method allows to establish the influence of the radius of rounding of the cutting edge of the knife on the components of the cutting force by matching cutting force curves for various finite element models, as well as pre-built stress. Computing calculations on a supercomputer allowed to develop a database of optimal cutting conditions during processing of various wood-based materials, which is the basis for the simulation of high-speed machining processes of wood materials when determining the relevant output parameters for woodworking enterprises.

**Key words:** methodology, computational experiments, model cutter, high-speed cutting, wood material handling modes.

**Введение.** Широкая гамма используемого современного дереворежущего инструмента обусловлена специфическими особенностями его работы: разнообразием обрабатываемых материалов (натуральная древесина, древесные плитные материалы и пластики); кинематикой

процесса резания (вращательное движение инструмента, криволинейное и прямолинейное и т. д.); видами резания (открытое, полузакрытое, закрытое); расположением лезвия в пространстве относительно оси вращения инструмента или результирующего вектора скорости и т. д. Изме-

нение условий работы инструмента в каждом конкретном случае приводит к изменению характеристик процесса резания (динамических нагрузок, мощности резания, периода стойкости инструмента, качества обработанной поверхности, ресурса инструмента и т. п.).

Применение новых обрабатываемых материалов на основе древесины в элементах конструкций мебели и строительных изделий, повышение требований к условиям работы высокопроизводительного деревообрабатывающего оборудования требуют оптимизации технологических процессов обработки древесных материалов, в том числе параметров используемых режущих инструментов и режимов их эксплуатации. В качестве критериев качества таких технологических процессов принято использовать себестоимость, энерго- и ресурсосбережение, производительность и др.

Для оптимизации высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов, в том числе параметров применяемого лезвийного режущего инструмента и режимов резания необходимо моделирование с применением производительных вычислительных систем и разработка основных зависимостей технико-экономических характеристик таких процессов [1].

В настоящее время для построения искомых зависимостей проводятся дорогостоящие лабораторные эксперименты и производственные испытания, связанные с длительностью протекания исследований и последующей обработкой большого массива полученных данных. Следовательно, выявление путей сокращения затрат ресурсов и длительности проведения натурных экспериментов за счет моделирования и оптимизации параметров быстропротекающих процессов при механической обработке древесных материалов лезвийным инструментом посредством применения высокопроизводительной вычислительной техники является актуальным для предприятий республики [2].

При резании древесных материалов в области контакта лезвия режущего инструмента с обрабатываемым материалом (время взаимодействия варьируется в диапазоне 0,01–0,0005 с) возникают значительные силы резания, области мгновенных высоких температур и кратковременных деформационных напряжений, которые накладывают ограничения на параметры технологических режимов эксплуатации инструмента, его конструктивные особенности и др. Такие агрессивные условия работы режущего инструмента с быстропротекающими в нем процессами являются причиной быстрого износа и разрушения поверхностных слоев инструмента, что в итоге вызывает быструю потерю им ре-

жущей способности или частичное (полное) разрушение.

**Основная часть.** Методика проведения вычислительных экспериментов для выявления зависимостей характеристик процесса резания от высокоскоростных режимов обработки материала основана на формировании рядов конечно-элементных моделей в вычислительной среде *LS-DYNA* с различными значениями радиуса округления режущей кромки при вершине лезвия дереворежущего ножа. В ходе проведения натурных экспериментов основным показателем эффективности процесса резания древесины является величина мощности на выходном валу (шпинделя станка). Мощность резания определяется по известной зависимости:

$$N = F_T \cdot v, \quad (1)$$

где  $F_T$  – тангенциальная сила, перпендикулярная радиусу округления режущей кромки при вершине лезвия ножа;  $v$  – линейная окружная скорость.

Алгоритм расчета мощности удобно рассмотреть на примере встречного фрезерования древесины сосны режущим инструментом. Сначала разрабатываются конечно-элементные модели для проведения вычислительных экспериментов со значениями радиуса округления при вершине лезвия ножа в интервале от 5 до 10 мкм с шагом 1 мкм и от 12 до 30 мкм с шагом 2 мкм. Далее генерируются ряды конечно-элементных моделей инструмента. Первично создается модель инструмента с сеткой, обеспечивающей радиус при вершине ножа 5 мкм (рис. 1).



Рис. 1. Изображение фрагмента конечно-элементной сетки ножа с округлением режущей кромки при вершине 5 мкм и конечно-элементной модели ножа с заготовкой

Модель ножа вставляется в конечно-элементную модель фрезы с одним ножом. Для каждого типоразмера ножа выполняется масштабирование только модели ножа с последующим параллельным переносом модели ножа таким образом, чтобы были обеспечены одинаковые исходные условия резания ножами. Из модели удаляются лишние конечные элементы для сохранения адекватности размеров ножа с радиусом 5 мкм и других размеров. После масштабирования и переноса модели ножа с новым значением радиуса при вершине выполняется ее множественный поворот вокруг оси инструмента (рис. 2).

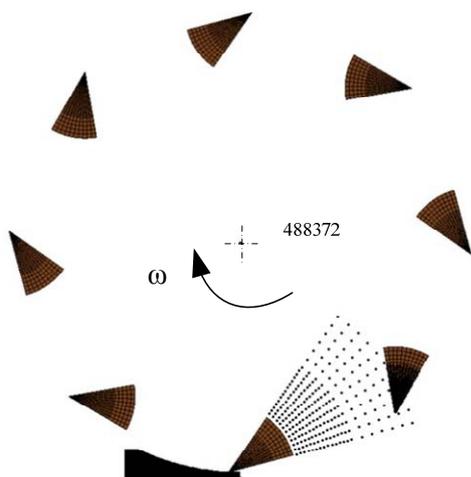


Рис. 2. Схема конечно-элементной модели фрезы с восемью ножами с радиусом скругления при вершине 20 мкм

Сила  $FT$  рассчитывается по формуле (2) как проекция силы резания  $F$  в точке контакта ножа с поверхностью на касательную прямую к окружности, как показано на рис. 3:

$$FT = F \cos(ALFA\_FT). \quad (2)$$

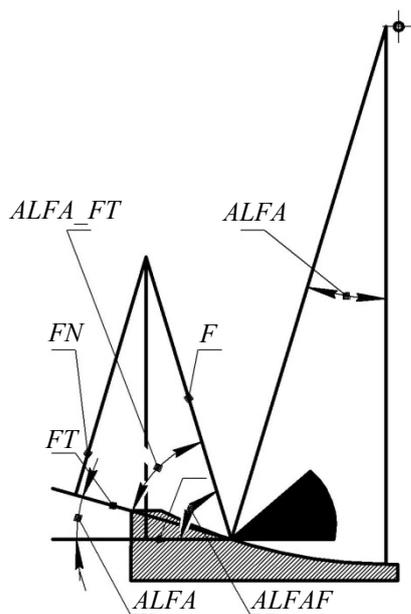


Рис. 3. Схема расчета сил резания

Угол  $(ALFA\_FT) = ALFA\_AF - ALFA$ , где  $ALFA\_AF$  – угол между силой резания  $F$  и горизонталью;  $ALFA$  – угол между тангенциальной силой резания  $FT$  и горизонталью.

Так как тангенциальная сила перпендикулярна радиусу в точке резания, а горизонталь перпендикулярна вертикали, то угол  $ALFA$  равен углу между радиусом и вертикалью.

Тогда угол  $ALFA$  можно рассчитать исходя из координат точки резания и оси вращения инструмента. Схема расчета угла показана на рис. 4.

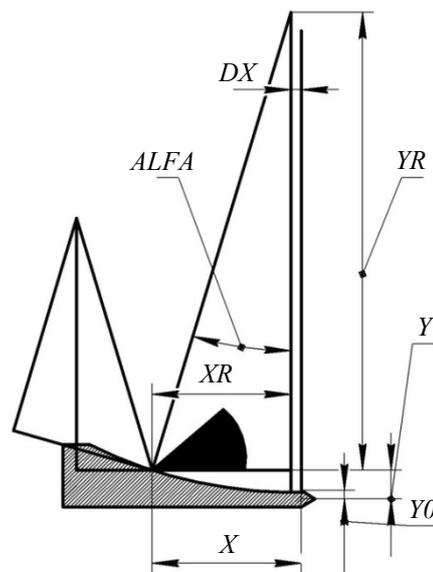


Рис. 4. Схема расчета угла  $ALFA$

Для расчета угла нужно найти значения катетов  $XR$  и  $YR$  треугольника разложения радиуса на горизонтальную и вертикальную проекции.

Катет  $XR$  рассчитывается по формуле

$$XR = X - DX, \quad (3)$$

где  $X$  – абсцисса точки резания;  $DX$  – абсцисса точки оси фрезы.

Катет  $YR$  рассчитывается по формуле

$$YR = DY - Y, \quad (4)$$

где  $DY$  – ордината точки оси фрезы;  $Y$  – ордината точки резания.

После расчета  $XR$  и  $YR$  рассчитывается угол  $ALFA$  по формуле

$$ALFA = ATAN(XR / YR). \quad (5)$$

Значение силы  $F$  рассчитывается из значений проекции силы на оси координат  $FX$  и  $FY$  как гипотенуза по катетам. Из проекций также рассчитывается и угол  $ALFA\_AF$  по формуле

$$ALFA\_AF = ATAN(FY / (-FX)), \quad (6)$$

где  $FX = -X$ -force;  $FY = -Y$ -force.

Методика проведения вычислительных экспериментов заключается в том, что в разработанную конечно-элементную модель добавляются карты назначения граничных условий: фиксации нижнего ряда узлов заготовки, продольного движения инструмента, имитирующего подачу с заданной скоростью, вращения ножей фрезы с заданной частотой, приложения боковых давлений и задания свойств материалов. Это позволяет установить влияние радиуса округления режущей кромки ножа на составляющие силы резания путем сопоставления графиков усилий резания, полученных в вычислительной среде для различных конечно-

элементных моделей, учитывая имитирующее предварительно-напряженное состояние древесного материала, например, после сушки или несимметричного первичного раскроя (рис. 5).

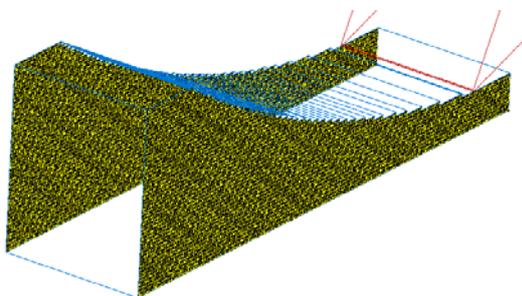


Рис. 5. Зоны приложения бокового давления, имитирующего предварительно-напряженное состояние обрабатываемой древесины после сушки

Для измерения сил резания разработана и отлажена расчетная модель согласно схеме, показанной на рис. 2. При этом расчетные выходные параметры фиксируются при взаимодействии

вии не первого ножа с обрабатываемой заготовкой, а второго, так как второй нож уже будет осуществлять резание по предварительно напряженному обрабатываемому материалу, как показано на рис. 6.

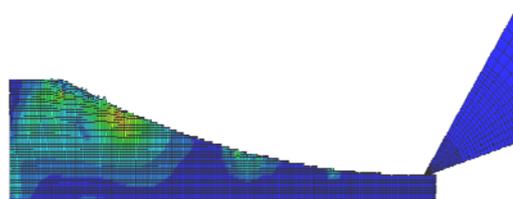


Рис. 6 Фотография поля напряжений при взаимодействии второго ножа с древесиной

Проведенные вычислительные эксперименты в среде LS-DYNA позволяют установить влияние радиуса округления режущей кромки ножа на составляющие силы резания путем сопоставления графиков усилий резания для различных конечно-элементных моделей (рис. 7–8), а также предварительно созданных напряжений в обрабатываемом материале.

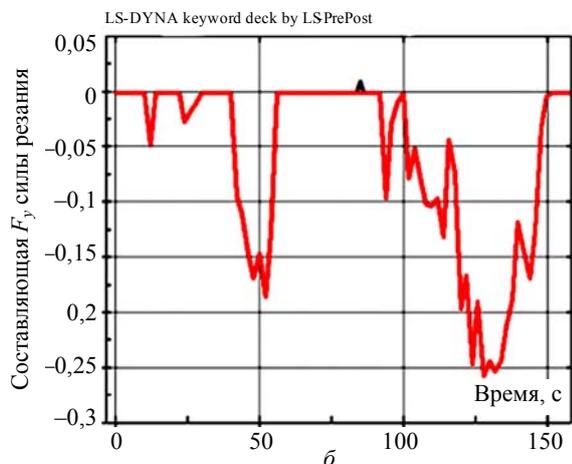
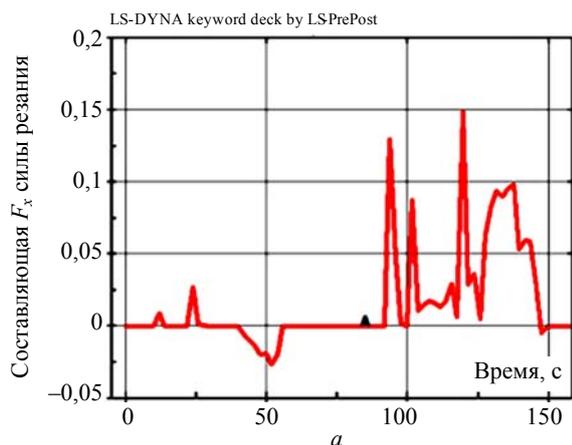


Рис. 7. Графики проекций силы резания при обработке древесины ножами со значениями радиусов округления режущих кромок 5 мкм: а – график проекций силы резания на ось X; б – график проекций силы резания на ось Y

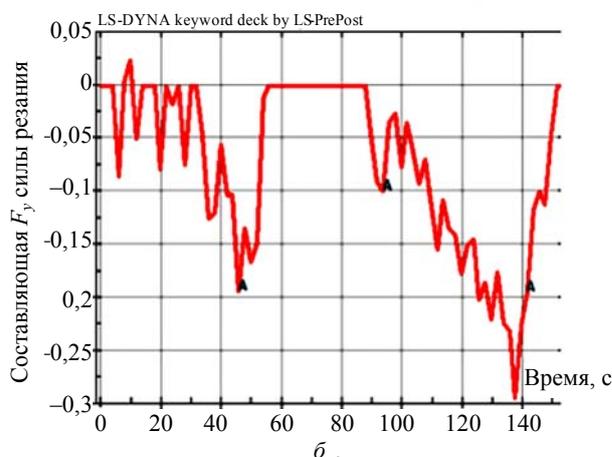
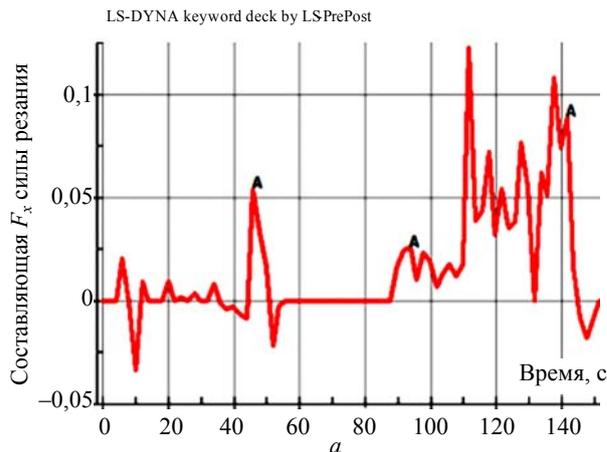


Рис. 8. Графики проекций силы резания при обработке древесины ножами со значениями радиусов округления режущих кромок 20 мкм: а – график проекций силы резания на ось X; б – график проекций силы резания на ось Y

Расчет вектора силы по проекциям сил на оси  $X$  и  $Y$  в каждой точке полученных графиков, а затем поиск интегральной величины модуля вектора составляющей силы от времени на участке работы одного ножа фрезы позволяют получить более точные результаты. Поделив значение этой интегральной величины на промежуток времени взаимодействия одного ножа фрезы с обрабатываемой заготовкой, рассчитывается среднее значение силы резания.

**Заключение.** Выполненные серии вычислительных экспериментов в высокопроизводительной среде LS-DYNA при исследовании быстропротекающих процессов резания древесины по предложенной к использованию методике позволяют установить влияние радиуса округления

режущей кромки ножа на составляющие силы резания, учитывая предварительно напряженное состояние обрабатываемой заготовки. В совокупности данные натурных экспериментов и расчеты на суперкомпьютере позволяют разработать базу оптимальных режимов резания при обработке различных древесных материалов, что является основой для разработки зависимостей основных технико-экономических характеристик процессов высокоскоростной обработки древесных материалов (производительность, качество обработки, силовые показатели, энергозатраты, износ и расход инструментов и т. п.) от параметров инструментов и технологических режимов обработки, имеющих важное прикладное значение для деревообрабатывающих предприятий республики.

### Литература

1. Huang J. M., Liang S. Y. Modeling of cutting forces under hard turning conditions considering tool wear effect // *Journal of manufacturing science and engineering*. 2005. Vol. 127(2), 2005. P. 262–270.
2. Раповец В. В., Медведев С. В., Иванец Г. Г. Моделирование фрезерования древесины в мультипроцессорной вычислительной среде на суперкомпьютере // *Труды БГТУ*. 2016. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 289–293.

### References

1. Huang J. M., Liang S. Y. Modeling of cutting forces under hard turning conditions considering tool wear effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2005, vol. 127(2), pp. 262–270.
2. Rapovets V. V., Medvedev S. V., Ivanets G. G. Modeling of wood cutting in the multiprocessing computing environment on a supercomputer. *Trudy BGTU* [Proceeding of BGTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 289–293 (In Russian).

### Информация об авторах

**Раповец Вячеслав Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: slavyan\_r@mail.ru

**Клепацкий Игорь Казимирович** – магистрант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lucky-35@mail.ru

**Медведев Сергей Викторович** – доктор технических наук, заведующий лабораторией. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: medv@newman.bas-net.by

**Иванец Григорий Григорьевич** – главный конструктор проекта. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: gemma3d@inbox.ru

### Information about the authors

**Rapovets Vyacheslav Valer'yevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavyan\_r@mail.ru

**Klepatskiy Ihar Kazimirovich** – Master's degree student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lucky-35@mail.ru

**Medvedev Sergey Viktorovich** – DSc (Engineering), Head of the Laboratory. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: medv@newman.bas-net.by

**Ivanets Grigoriy Grigor'yevich** – Chief Designer of the project. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gemma3d@inbox.ru

Поступила 20.04.2017