

УДК 621.914:674:004

**В. В. Раповец<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**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ  
В МУЛЬТИПРОЦЕССОРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ  
НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ**

Разработана методика проведения вычислительных экспериментов в пакете LS-DYNA, которая обеспечивает 15%-ную относительную погрешность по сравнению с результатами натурных экспериментов в лабораторных условиях. Методика основана на методе конечных элементов с использованием формулировки Лагранжа и представлением модели заготовки в виде сетки свободных элементов Галеркина (EFG). Материал заготовки представляется моделью пакета LS-DYNA. Конечно-элементная модель заготовки является объемной. Базовым конечным элементом модели заготовки служит параллелепипед. Добавлен критерий разрушения материала по максимальной его деформации при взаимодействии с ножом. Инструмент представлен совокупностью ножей. Коэффициенты модели материала верифицированы путем сравнения графиков силы, действующей на инструмент при давлении ножа на заготовку в вертикальном направлении с заданной скоростью движения, и аналогичного графика вертикальной составляющей силы резания, измеренной по данным вычислительных экспериментов по моделированию процесса с идентичной схемой резания и геометрическими размерами ножа и заготовки.

Методика проверена на моделировании фрезерования заготовки из древесины сосны фрезой диаметром 125 мм с четырьмя ножами по схемам встречной и попутной обработки. Получены фотографии полей распределения деформаций и напряжений при резании для различных моментов времени, а также графики проекций силы резания на координатные оси. Различный характер распределения сил резания при встречном и попутном фрезеровании древесины сосны подтвержден данными графиками.

**Ключевые слова:** методика компьютерного моделирования, фрезерование, высокоскоростное резание, древесина, эксперимент, мультипроцессорные вычисления.

**V. V. Rapovets<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**MODELING WOOD MILLING IN MULTIPROCESSOR  
COMPUTING ENVIRONMENT**

The method of computing experiments in LS-DYNA package. This method provides 15% relative error compared with the results of field experiments in the laboratory. The technique is based on the finite element method using the Lagrange formulation and presentation of the model in the form of billets its grid-Galerkin the free elements (EFG). The workpiece model seems LS-DYNA package. Finite element model of the workpiece is volume. The basic finite element fashion-whether a box is blank. Added test material destruction on a maximum of its deformation in the interaction with a knife. The tool is represented by a set of knives. The coefficients of the material model are verified by comparing the graphs of the force acting on the tool at a pressure of the blade on the workpiece in the vertical direction for-this movement speed and a similar graph of the vertical component force cutting, measured according to numerical experiments modeling process with identical cutting circuit and the geometric dimensions of the knife and the workpiece.

Methods tested on the simulation of the workpiece milling pine wood cutter with diameters of 125 mm with four knives on the counter circuits and concurrent processing. Get photos of fields of deformations and stress distribution in cutting various moments of time, as well as the graphics of the cutting force of the projections on the coordinate axes. Various character of distribution of cutting forces when meeting and passing milling pine confirmed this graphs.

**Key words:** methods of computer modeling, milling, high-speed cutting, timber, experiment, multiprocessor computing.

**Введение.** В настоящее время на деревообрабатывающих предприятиях в Республике Беларусь для механической обработки различных древесных материалов и древесины используется импортный дереворежущий инструмент. Увеличение номенклатуры обрабатываемых материалов на основе древесины, интенсификация условий работы деревообрабатывающего оборудования требует оптимизации конструкций режущих инструментов и технологических режимов их эксплуатации с учетом основных технико-экономических факторов.

Особенностью механической обработки древесины и древесных материалов является то обстоятельство, что данный процесс протекает достаточно быстро. Высокие частота вращения режущих инструментов и скорость подачи при обработке древесных материалов требуют применения дорогостоящей высокоточной измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Для оптимизации конструкторско-технологических параметров режущего инструмента, разработки методов расчета основных показателей (силовых, параметров износа и т. д.) процесса высокоскоростной механической обработки древесных материалов проводятся дорогостоящие лабораторные и промышленные исследования, связанные с длительностью протекания эксперимента и длительнейшей трудоемкой обработкой большого массива полученных экспериментальных данных.

Моделирование высокоскоростных процессов механической обработки древесных материалов лезвийным инструментом в пакете LS-DYNA с расчетом параметров модели позволяет создавать новые энергоэффективные конструкции дереворежущих инструментов и обосновывать оптимальные режимы их эксплуатации.

**Основная часть.** При постановке подобного рода задач при моделировании процессов возможно применение различных описаний сплошной среды: Лагранжево, Эйлера или обобщенное на основе Лагранжево-Эйлерово описания (англ. Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE).

В Лагранжевом подходе для описания поведения сплошной среды расчетная сетка движется и деформируется вместе с материалом. Область применения Лагранжевых решателей ограничивается задачами со сложными граничными условиями. Основным недостатком является возможность получения неправильных результатов, так как в случае, если материал имеет возможность больших деформаций, следовательно, и сетка будет деформироваться настолько сильно, что это может приводить к получению некорректных результатов [1, 2].

В формулировке Эйлера узлы сетки остаются в фиксированном положении, а материал при моделировании течет через сетку. Метод Эйлера применяется в основном для моделирования жидкостей, но его частично можно применять и для моделирования твердых тел.

Лагранжево-Эйлерово описание является комбинацией вышеприведенных двух постановок. Исследователь сам определяет движение сетки с целью минимизации ее искажений. Поэтому для данной формулировки требуется довольно высокий уровень пользователя.

Общая методика создания расчетных моделей в пакете LS-DYNA состоит из следующих последовательных этапов:

- 1) в CAD системе создается геометрическая модель инструмента и материала;
- 2) на основе геометрической модели генерируется конечно-элементная сетка;
- 3) конечно-элементная модель заготовки строится в пакете LS-PrePost;
- 4) режимы резания задаются с помощью карт граничных условий;
- 5) с помощью карт материала и карт контактов определяются коэффициенты математической модели процесса резания [3].

Для моделирования процесса резания в пакете LS-DYNA рекомендуется использовать следующие модели инструмента и материалов:

- для режущего инструмента:  
\*MAT\_ELASTIC,\*MAT\_RIGID с EFG;
- для обрабатываемой заготовки из разных материалов:  
\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC;  
\*MAT\_JOHNSON\_COOK;  
\*MAT\_ORIENTED\_CRACK;  
\*MAT\_ELASTIC\_VISCOPLASTIC\_THERMAL;  
\*MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY;  
\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY.

Расчетная схема фрезерования при высокоскоростной обработке древесины сосны представлена на рис. 1.

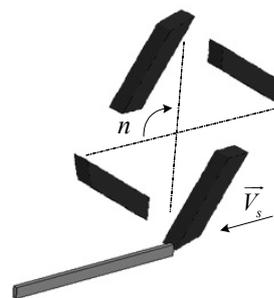


Рис. 1. Расчетная схема фрезерования при обработке древесины сосны

Объектами моделирования в расчетной модели являются ножи фрезы и заготовка.

Модели для расчета в пакете LS-DYNA описываются в текстовом формате ASCII кодов. Основной структурной единицей описания является карта. Каждая карта описывает отдельный компонент расчетной модели – узел, конечный элемент, материал, усилие, контакт и т. д. Вводятся карты ключевыми словами, соответствующими ее семантике. Карты группируются в Key-файлы (файлы с расширением \*.k). Структура строки определяется видом карты. Карты можно разделить на следующие группы:

- описание объектов моделирования;
- задание контактов между объектами;
- карты задания параметров движения;
- карты задания условий закрепления;
- карты управления процессом расчета;
- карты вывода результатов расчета в файл.

Такая методика применима для исследования изменения состояния заготовки в процессе механической обработки. В этом случае режущий инструмент является абсолютно жестким телом. Свойства инструмента задаются картой \*MAT\_RIGID. Тогда поступательное движение задается картами \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID и \*DEFINE\_CURVE, а вращательное – картами \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID\_LOCAL, \*DEFINE\_COORDINATE\_NODES и \*DEFINE\_CURVE. Карты привязываются к центру масс абсолютно жесткого инструмента.

Представленные описания для моделирования процессов в пакете LS-DYNA с формулировками Лагранжа, Эйлера, обобщенной ALE, имеют свои отличительные особенности и области применения. Для получения достоверных моделей, максимально близких при воспроизведении к реальному процессу высокоскоростной лезвийной обработки анизотропных древесных материалов, при постановке задачи предпочтительно использовать формулировку Лагранжа. При этом необходимо проводить значительный объем суперкомпьютерных вычислений и сравнивать их с результатами экспериментальных исследований, осуществляя корректировку созданной модели верифицированными коэффициентами.

Таким образом, моделирование фрезерования древесины в пакете LS-DYNA состоит из следующих пошаговых действий: разработать расчетную модель, описать объекты моделирования, задать взаимодействие между объектами, задать параметры движения и условия закрепления, определить условия расчета.

В результате моделирования процесса фрезерования и расчета в пакете LS-DYNA получены фотографии напряженно-деформирован-

ного состояния заготовки из древесины сосны при заданных условиях резания, описанных ниже (рис. 2, 3), и соответствующие графики сил резания в продольном (рис. 4) и торцовом (рис. 5) направлениях по отношению к волокнам древесины.

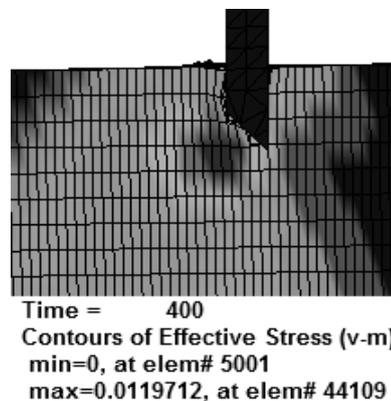


Рис. 2. Фотография полей распределения напряжений при резании в продольном направлении

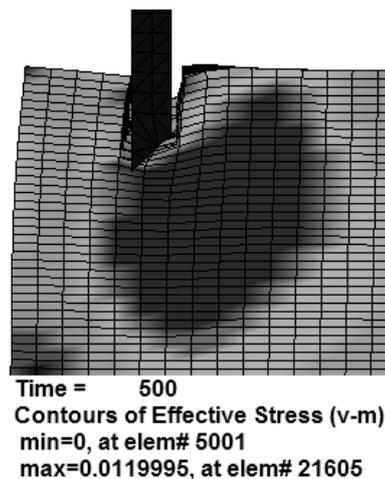


Рис. 3. Фотография полей распределения напряжений при резании в торцовом направлении

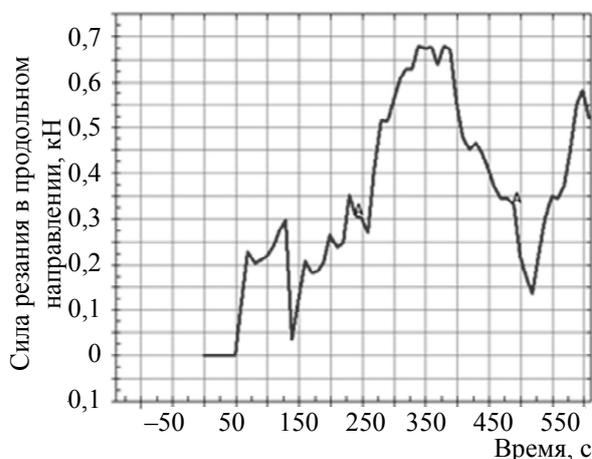


Рис. 4. График изменения силы резания в продольном направлении

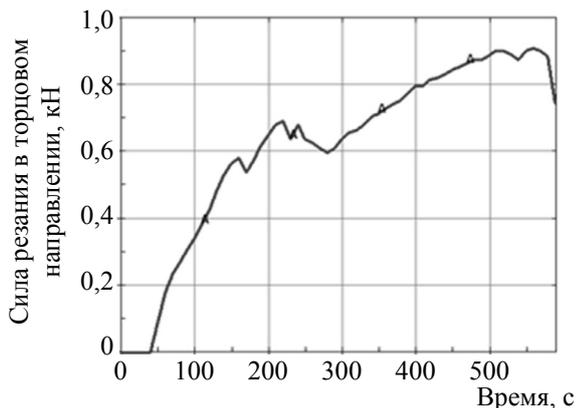


Рис. 5. График изменения силы резания в торцовом направлении

Для получения адекватной модели фрезерования необходимо осуществить верификацию свойств модели материала. Для этого необходимо было выполнить экспериментальные исследования (натурные испытания) аналогичные созданной расчетной модели.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств древесины сосны для моделирования фрезерования в пакете LS-DYNA выполнялись на экспериментальной установке MTS (рис. 6).



Рис. 6. Экспериментальная установка MTS

Для механического крепления дереворежущего ножа из твердого сплава специально разработано и изготовлено приспособление для исследований (экспериментальный образец) на установке MTS, показано на рис. 7. Приспособление изготовлено из стали 40X.

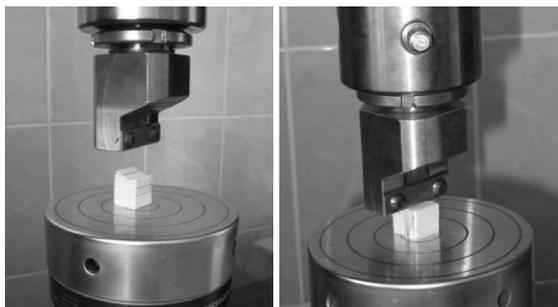


Рис. 7. Приспособление для крепления ножей

Условия проведения экспериментов следующие:

- параметры дереворежущего ножа: габаритные размеры  $12 \times 40 \times 1,0$  мм; угол заточки  $\beta = 45^\circ$ ; материал ножа твердый сплав ВК6;
- параметры заготовки:  $10 \times 10 \times 20$  мм, древесина сосны;
- направление перемещение ножа: по отношению к волокнам древесины – продольное, торцовое; скорость перемещения ножа 500 мм/с; глубина проникновения дереворежущего ножа в образец древесины 5 мм.

Выходные измеренные параметры на установке: сила резания. Кратность повторения экспериментов равнялась 5.

Результат изменения силы резания при взаимодействии ножа в зависимости от направления волокон древесины сосны представлены на рис. 8 (для продольного резания) и рис. 9 (для торцового резания).

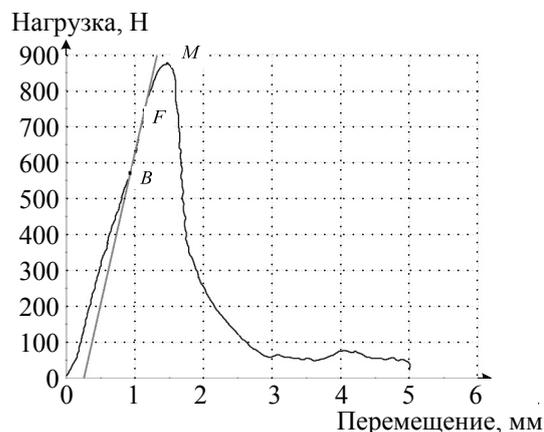


Рис. 8. График изменения силы в натурных испытаниях при продольной схеме резания

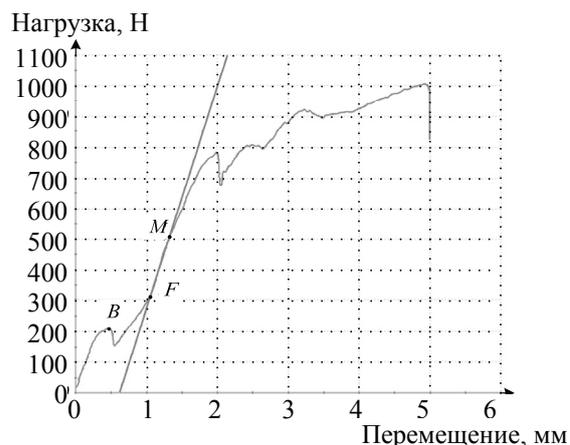


Рис. 9. График изменения силы в натурных испытаниях при торцовой схеме резания

Данные графики позволили уточнить коэффициенты в картах материала. Анализ графиков изменения силы резания, полученных расчетным путем (рис. 4, 5), и результатов натурных

экспериментов (рис. 8, 9) показал, что графики изменения силы в продольном и в торцовом направлениях совпадают с графиками изменения силы резания при проведении натуральных испытаний, с погрешностью не более 15%, причем в завершающей фазе испытаний.

**Заключение.** Представленные результаты моделирования с выполнением суперкомпьютерных расчетов в среде LS-DYNA дополнительно проверены на моделировании фрезерования заготовки размерами 10×10×50 мм фрезой диаметром 125 мм с четырьмя ножами со схемами резания встречного и попутного фрезерования. Получены фотографии полей рас-

пределения напряжений и деформаций при резании для различных моментов времени, графики силы резания на координатные оси. Расчетные значения проекций сил резания согласуются с ранее выполненными исследованиями и подтверждаются учеными развития теории резания древесины. Таким образом, реализуется возможность исследования параметров напряженного состояния заготовки на стадии резания, съема основного припуска и выхода ножа из заготовки при фрезеровании в объемном представлении на заготовках большого размера при проведении расчетов в мультипроцессорной вычислительной среде на суперкомпьютере.

### Литература

1. Huang J. M., Black J. T. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996. Vol. 118, no. 4. P. 545–554.
2. Ceretti E., Fallbohmer P., Wu W. T., Atlan T. R. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting // Journal of Materials Processing Technology, 1996. Vol. 59. P. 169–180.
3. Методика моделирования процесса механической обработки древесных материалов фрезерованием в пакете LS-DYNA / В. В. Раповец [и др.] // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 2015. С. 170–176.

### References

1. Huang J. M., Black J. T. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, vol. 118, no. 4, pp. 545–554.
2. Ceretti E., Fallbohmer P., Wu W. T., Atlan T. R. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting // Journal of Materials Processing Technology, 1996, vol. 59, pp. 169–180.
3. Rapovets V. V., Grishkevich A. A., Medvedev S. V., Ivanets G. G. The methodology of modeling during machining of wood materials by milling in the soft LS-DYNA. *Trudy X Mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma (Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovanie, menedzhment XXI veka)* [Proceedings X of the International euroasian symposium (Woodworking. Technologies. Equipment. Management at the XXI century)]. Ekaterinburg, 2015, pp. 170–176 (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

**Медведев Сергей Викторович** – доктор технических наук, заведующий лабораторией. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь).

**Иванец Григорий Григорьевич** – главный конструктор проекта. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь).

### 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

**Medvedev Sergey Viktorovich** – PhD (Engineering), Head of the Laboratory. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus).

**Ivanets Grigoriy Grigor'yevich** – the Chief Designer of the project. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus).

Поступила 16.02.2016