

В.В. Раповец (V.V. Rapovets)

(БГТУ, г. Минск, РБ),

С.В. Медведев, Г.Г. Иванец

(S.V. Medvedev, G.G. Ivanec)

(ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: slavyan_r@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ LS-DYNA

MODELING OF HIGH SPEED WOOD PROCESSING BY MILLING IN A COMPUTING ENVIRONMENT LS-DYNA

Разработана методика проведения вычислительных экспериментов в пакете LS-DYNA, которая обеспечивает относительную погрешность (15 %) по сравнению с результатами натурных экспериментов в лабораторных условиях.

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 графиками.

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.

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.

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. 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.

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 дорогостоящих высокоточных измерительных и регистрирующих приборов.

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 дальнейшей 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. При постановке подобного рода задач при моделировании процессов возможно применение различных описаний сплошной среды: Лагранжево, Эйлера или обобщенное на основе Лагранжево-Эйлерового 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 режущего инструмента и обрабатываемого материала (заготовки);
- 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 и *MAT_RIGID с EFG;
- для обрабатываемой заготовки из различных 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 рисунке 1.

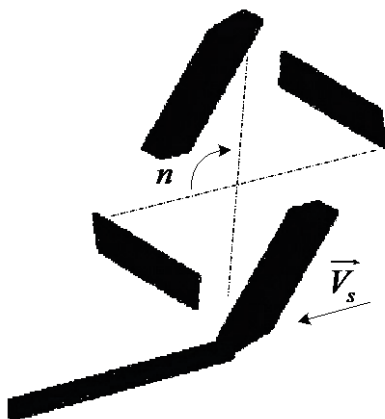


Рис. 1. Расчетная схема фрезерования при обработке древесины сосны

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 исследований 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.

Такие 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-деформированного 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.

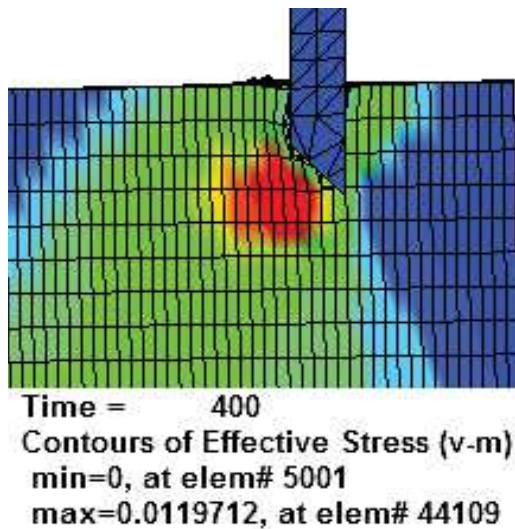


Рис. 2. Фотография полей распределения напряжений при резании в продольном направлении

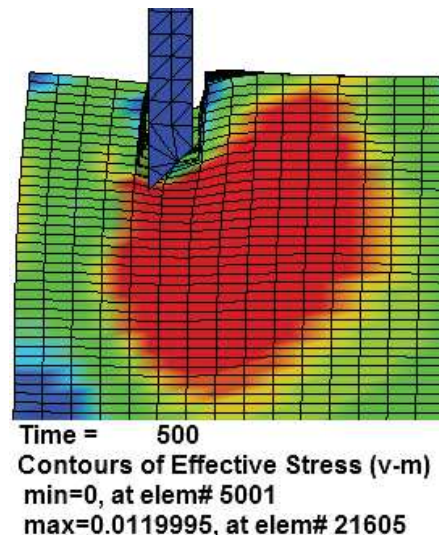


Рис. 3. Фотография полей распределения напряжений при резании в торцовом направлении

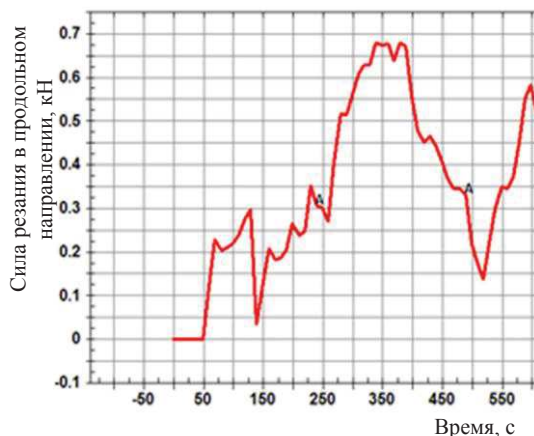


Рис. 4. График изменения силы резания в продольном направлении

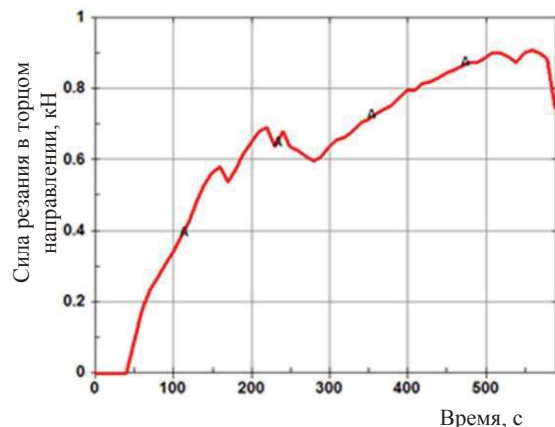


Рис. 5. График изменения силы резания в торцовом направлении

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 (как показано на рисунке 7). Приспособление изготовлено из стали 40Х.



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 рисунках 8 (для продольного резания) и 9 (для торцового резания).

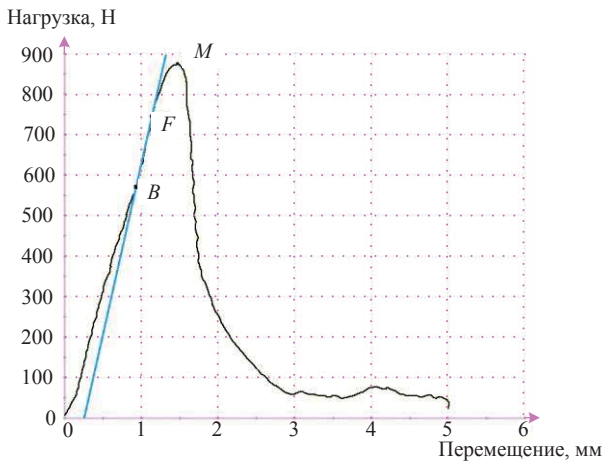


Рис. 8. График изменения силы в натуральных испытаниях при продольной схеме резания

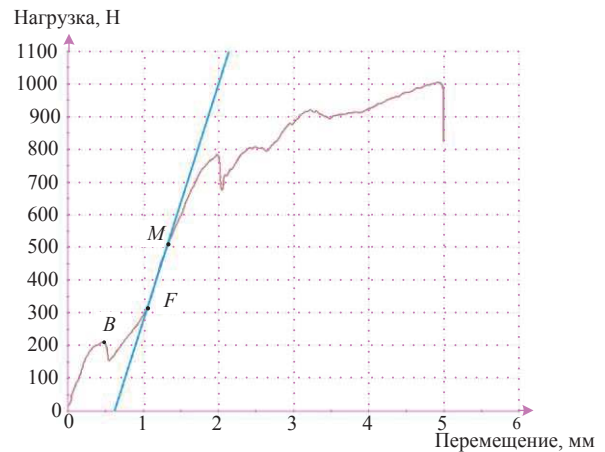


Рис. 9. График изменения силы в натуральных испытаниях при торцовой схеме резания

Представленные графики позволили уточнить коэффициенты в картах материала. Анализ графиков изменения силы резания, полученных расчетным путем в вычислительной среде LS-DYNA (рис. 4, 5), и результатов экспериментальных исследований (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.

Полученные результаты моделирования с выполнением суперкомпьютерных расчетов в среде LS-DYNA проверены на моделировании фрезерования заготовки из древесины сосны размерами $10 \times 10 \times 50$ мм фрезой диаметром 125 мм с четырьмя ножами со схемами резания встречного и попутного фрезерования. Получены фотографии полей распределения 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 врезания, съема основного припуска и выхода ножа из заготовки при фрезеровании в объемном представлении на заготовках большого размера при проведении расчетов в мультипроцессорной вычислительной среде LS-DYNA на суперкомпьютере.

Библиографический список

1. Huang, J.M. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining / J.M. Huang, J.T. Black // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996. – Vol. 118, no. 4. – Pp. 545–554.
2. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting / E. Ceretti, P. Fallbohmer, W.T. Wu, T.R. Atlan // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Vol. 59. – Pp. 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 Международ. евразийск. симпозиума. – Екатеринбург, 2015. – С. 170–176.