

УДК 674.914:674.338

**В. В. Раповец<sup>1</sup>, С. В. Медведев<sup>2</sup>, И. К. Клепацкий<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ВЫСОКОЙ ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ  
ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В данной статье сформированы обоснованные граничные условия суперкомпьютерных предварительных расчетов, разработана и предложена к использованию методика проведения вычислительных экспериментов с использованием механизма дискретных частиц по виртуальному резанию древесного анизотропного материала выбранным типом фрезерного инструмента. Представлены корректные геометрические и конечно-элементные модели с высокой детализацией анизотропного обрабатываемого древесного материала и перспективной фрезы с наноразмерной режущей вставкой, создающей предпосылки для реализации процессов самозатачивания инструмента в процессе работы.

Рассмотрены подходы отражения анизотропных свойств древесных материалов в вычислительных суперкомпьютерных экспериментах, которые требуют более детального рассмотрения. Предложенная методика проведения вычислительных экспериментов ставит целью работы выявить зависимости характеристик процесса резания от высокоскоростных режимов и позволяет исследовать параметры режимов обработки, учитывая изменение физико-механических свойств от сердцевинной части к заболонной при изменении ее относительной влажности, а также изменение трехмерного напряженно-деформированного состояния древесины после удаления влаги в структуре древесины (сушке). Полученные результаты исследований являются основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов, при определении значимых выходных технологических параметров для деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** моделирование, механическая обработка, древесный материал, фреза, вычислительный эксперимент, конечно-элементная модель, производство.

**V. V. Rapovets<sup>1</sup>, S. V. Medvedev<sup>2</sup>, I. K. Klepatski<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus**INDUSTRIAL TESTS OF MODIFIED KNIVES  
IN THE AGGREGATE PROCESSING OF WOOD**

In this article, reasonable boundary conditions for supercomputer preliminary calculations are formed, a methodology for conducting computational experiments using the mechanism of discrete particles for virtual cutting of wood anisotropic material with the selected type of milling tool is developed and proposed. Correct geometric and finite element models with high detail of anisotropic processed wood material and a perspective cutter with a nano-sized cutting insert, which creates the prerequisites for the implementation of self-sharpening tools in the process, are presented.

Approaches to reflecting the anisotropic properties of wood materials in computational supercomputer experiments, which require a more detailed consideration, are considered. The proposed methodology for conducting computational experiments to identify the dependences of the characteristics of the cutting process on high-speed modes allows us to study the parameters of the processing modes, taking into account the change in the physico-mechanical properties from the heart-wine part to the sap portion with a change in its relative humidity, as well as a change in the three-dimensional stress-strain state of wood after removing moisture in the wood structure (drying). The obtained research results are the basis for modeling high-speed processes of blade processing of wood materials, when determining significant output technological parameters for woodworking enterprises of the Republic of Belarus.

**Key words:** modeling, machining, wood material, mill, computational experiment, finite element model, production.

**Введение.** Эксплуатация дорогого импортного оборудования и фрезерного инструмента на деревообрабатывающих производствах Республики Беларусь для обработки материалов на

основе древесины в каркасах, фасадах мебели и строительных изделий, повышение требований к условиям работы высокопроизводительных машин требуют оптимизации деревообработки,

параметров конструкций режущих инструментов. В качестве критериев оптимизации таких технологических процессов наиболее часто используются производительность, энергоемкость, себестоимость изделия, обработки и др.

Для получения выходных данных и построения обозначенных закономерностей проводятся длительные лабораторные и производственные эксперименты с последующим анализом большой базы полученных данных. В связи с этим снижение затрат энергетических и материальных ресурсов, сокращение времени на проведение натуральных экспериментов за счет моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов при механической обработке фрезерным инструментом с применением суперкомпьютерных вычислительных технологий является актуальной задачей. Методы оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования древесины и древесных материалов с использованием полученных закономерностей [1] должны обеспечивать требуемые характеристики производительности, себестоимости, энергоемкости и качества продукции и быть устойчивыми к влиянию неопределенных факторов.

**Основная часть.** Для совершенствования и оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования анизотропных материалов (древесины и древесных материалов), параметров эксплуатируемого режущего инструмента и технологических режимов обработки необходимо моделирование с высокой степенью детализации результатов и построение основных технико-экономических характеристик таких процессов с возможностью их использования в современных деревообрабатывающих машинах на производстве [2, 3].

В результате выполненных научных исследований разработаны геометрические и конечно-элементные модели обрабатываемого анизотропного материала и режущего инструмента с использованием механизма дискретных частиц, проведены предварительные суперкомпьютерные вычислительные эксперименты в мультипроцессорной среде LS-DYNA [4].

Процесс моделирования в подобных вычислительных средах позволяет обозначить несколько подходов отражения анизотропных свойств древесных материалов в вычислительных суперкомпьютерных экспериментах, которые требуют более детального рассмотрения. Удаётся выделить как минимум три не альтернативных подхода:

1) первый подход базируется на достаточно сложном описании модели материала пакета LS-DYNA – MAT\_WOOD\_{OPTION};

2) суть второго подхода в следующем: анизотропия механических свойств может воспро-

изводиться за счет создания своего рода «слоеного пирога», в котором по известным закономерностям изменяются свойства внутренних и наружных слоев обрабатываемого древесного образца древесины;

3) третий подход заключается в предположении одинаковых механических свойств образца древесины. Анизотропия в известной степени может воссоздаваться приложением внешних уравнивающих сил к необрабатываемым поверхностям. Эти силы практически эквивалентны силам, возникающим при просушивании древесины, приводящим к ее растрескиванию, короблению и формированию внутреннего напряженного-деформированного состояния.

Вычислительные суперкомпьютерные эксперименты на параллельных архитектурах СКИФ выполнялись в лицензионном пакете нелинейного динамического анализа LS-DYNA [5].

Первоначально трехмерная геометрическая твердотельная модель эффективной фрезы для обработки натуральной древесины и древесных материалов сформирована в пакете Solid Works (рис. 1). Построена модель фрезерного инструмента (ножа) с наноразмерной вставкой из тугоплавкой износостойкого материала, обеспечивающей в процессе работы эффект самозатачивания.

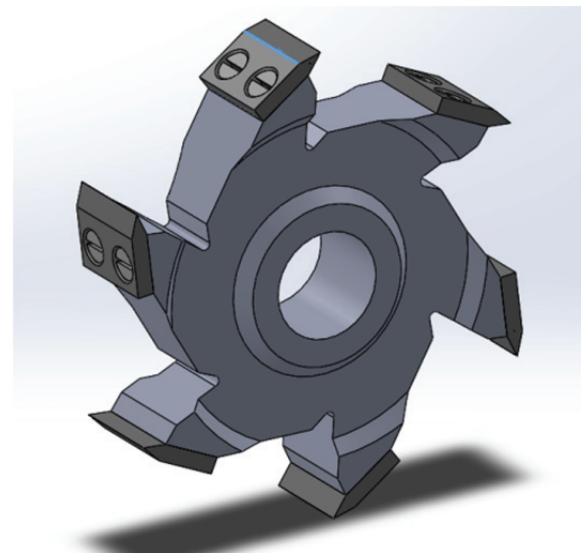


Рис. 1. Трехмерная геометрическая твердотельная модель эффективной фрезы, сформированная в пакете Solid Works

В геометрическую модель фрезы с целью ее конструктивного упрощения при выполнении последующих расчетов в пакете LS-DYNA авторами внесены определенные изменения. Это обеспечило возможности формирования корректных конечно-элементных моделей обрабатываемого анизотропного материала и режущего инструмента (рис. 2, 3) [1].

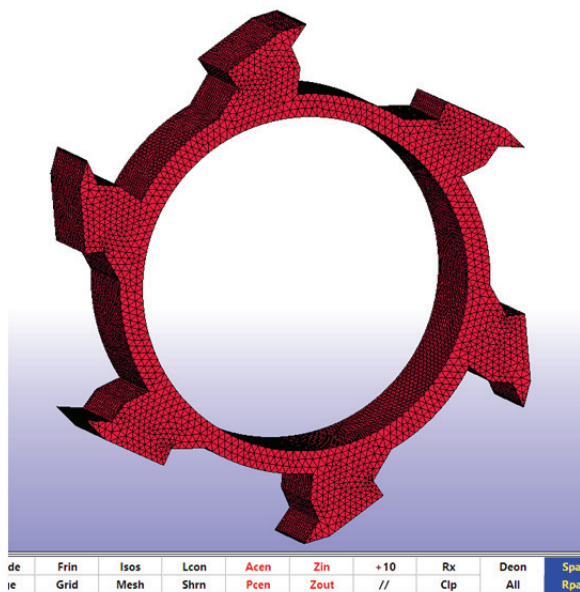


Рис. 2. Конечно-элементная модель фрезерного инструмента

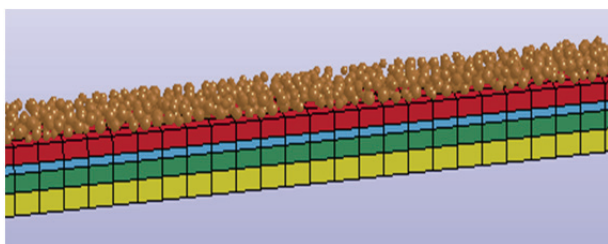


Рис. 3. Конечно-элементная модель обрабатываемого древесного материала (верхний слой представлен набором дискретных частиц)

На специальном языке описания пакета LS-DYNA указывались следующие карты:

- для инициализации дискретных частиц: \*CONTROL\_DISCRETE\_ELEMENT;
- для указания части модели, использующей дискретные частицы: \*PART, \*SECTION\_SOLID, \*MAT\_ELASTIC;
- для инициализации геометрических объемов, в которых дискретные частицы будут взаимодействовать с моделями фрезы и режущей пластины: \*DEFINE\_BOX, \*DEFINE\_DE\_ACTIVE\_REGION, \*DEFINE\_DE\_BOND;
- карта изменения во времени скорости горизонтальной подачи древесного материала при встречном фрезеровании: \*DEFINE\_CURVE;
- карта изменения во времени угловой скорости вращения фрезы при встречном фрезеровании древесины: \*DEFINE\_CURVE;
- карта воздействия сил гравитации на все элементы трехмерной динамической сцены: \*DEFINE\_CURVE\_TITLE.

В проведенных вычислительных суперкомпьютерных экспериментах удалось эффективно совместить макроразмеры фрезы и обрабатываемого

материала с микропараметрами режущей пластины и параметрами дискретных частиц, использование которых особенно эффективно на параллельных вычислительных архитектурах [6, 7, 8].

В результате выполненных суперкомпьютерных экспериментов на параллельных архитектурах СКИФ в лицензионном пакете нелинейного динамического анализа LS-DYNA по созданным моделям получены верифицированные значения сил резания (давления) на поверхностях ножа, значения мощности резания, параметры технологической стойкости лезвия при обработке древесины как анизотропного материала (рис. 4, 5) [9]. Представленные результаты могут быть использованы для построения математических моделей и разработки методов оптимизации и адаптивного управления параметрами технологических процессов высокоскоростной механической обработки древесных материалов, позволяющих прогнозировать рациональные режимы резания и конструкции ресурсосберегающего инструмента.

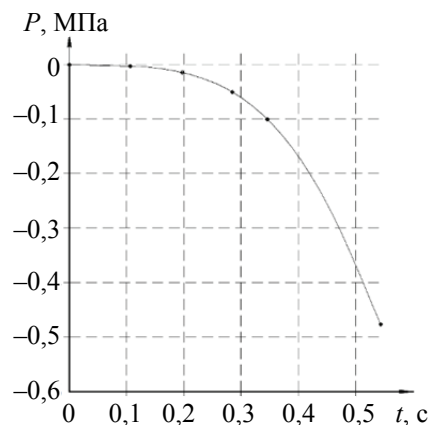


Рис. 4. График изменения во времени давления (усилий резания, мощности) на режущих поверхностях ножа фрезы

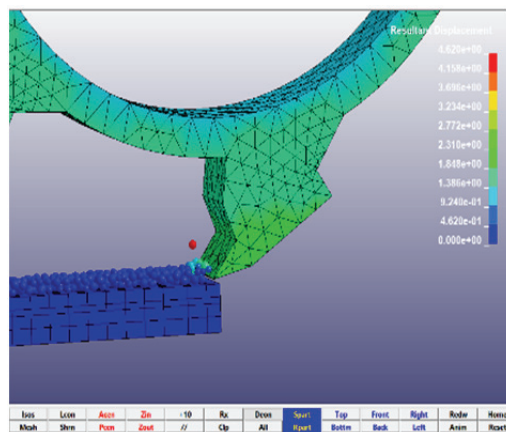


Рис. 5. Динамическое взаимодействие фрезы с моделью древесного материала, представленного набором дискретных частиц

Динамическое взаимодействие модели фрезы с моделью древесного материала, представленного набором дискретных частиц, показано на рис. 5.

В качестве вычислительных суперкомпьютерных ресурсов использовались кластеры СКИФ – GPU-NEXT, СКИФ – GEO – Office, а также самый высокопроизводительный на данный момент в Республике Беларусь кластер СКИФ – GEO – ЦОД.

Из проведенных вычислительных основных и дополнительных экспериментов напрашивается вывод о влиянии величины крутящего момента на параметры, определяющие энергетические затраты процесса высокоскоростной обработки древесных материалов. Усилия резания имеют определенную тенденцию к снижению при возрастании крутящего момента на исполнительном режущем инструменте.

**Заключение.** Полученные результаты могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволит суще-

ственно повысить эффективность действующего деревообрабатывающего производства.

Данный вывод заслуживает особого внимания, т. к. может открыть новое направление в совершенствовании процесса резания практически без дополнительных затрат, связанных с геометрическими и прочностными характеристиками современных режущих твердосплавных и иных пластин с упрочненными поверхностями. Требуется дополнительные теоретические, вычислительные и экспериментальные работы для подтверждения (или опровержения) найденного эффекта. Допускаем, что дополнительный углубленный анализ цикла работ немецких коллег по экспериментальному определению рациональных режимов резания может быть весьма полезен в данном случае.

Представленные результаты исследований являются основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов при определении значимых выходных параметров для предприятий ОАО «Речицадрев», ЗАО «Молодечномебель», филиал «Вилейская мебельная фабрика» и других деревообрабатывающих предприятий.

### Список литературы

1. 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.
2. Huang J. M., Black J. T. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996. P. 545–554.
3. 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. P. 169–180.
4. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В. В. Раповец [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2017. № 2. С. 360–364.
5. LS-DYNA: keyword user's manual // Livermore Software Technology Corporation. Jan. 2007. Vol. 971. 2196 p.
6. Totis G., Albertelli P., Monno M. Efficient Evaluation of Process Stability in Milling With Spindle Speed Variation by Using the Chebyshev Collocation Method // *J. Sound Vib.* 2014. No. 333(3). P. 646–668.
7. Пантелеев А. В., Летова Т. А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2005. 544 с.
8. Kiss A. K., Bachrathy D., Gabor S. Effects of Varying Dynamics of Flexible Workpieces in Milling Operations // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Jan 2020. No. 142 (1). P. 144–155.
9. Раповец В. В. Методика расчета мощности в программной среде LS-DYNA через мгновенные значения сил и скоростей резания при фрезеровании древесины // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2018. № 2 (210). С. 290–295.

### References

1. Rapovets V. V., Grishkevich A. A., Medvedev S. V., Ivanec G. G. The methodology of modeling during machining of wood materials by milling in the soft LS-DYNA. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye: menedzhment XXI veka: Trudy X mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI Century: Proceedings of the X International. Evraz. Symposium], Ekaterinburg, 2015, pp. 170–176 (In Russian).
2. Huang J. M., Black J. T. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1996, pp. 545–554.

3. 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, pp. 169–180.

4. Rapovets V. V., Klepatski I. K., Medvedev S. V., Ivanec G. G. Computational experiments of high-speed blade cutting of wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2017, pp. 360–364 (In Russian).

5. LS-DYNA: keyword user's manual. *Livermore Software Technology Corporation*, jan. 2007, vol. 971. 2196 p.

6. Totis G., Albertelli P., Monno M. Efficient Evaluation of Process Stability in Milling With Spindle Speed Variation by Using the Chebyshev Collocation Method. *J. Sound Vib.*, 2014, no. 333 (3), pp. 646–668.

7. Panteleev A. V., Letova T. A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh: ucheb. posobiye* [Optimization theorems in examples and tasks: textbook. Allowance]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 544 p.

8. Kiss A. K., Bachrathy D., Gabor S. Effects of Varying Dynamics of Flexible Workpieces in Milling Operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jan 2020, no. 142(1), pp. 144–155.

9. Rapovets V. V., Klepatski I. K., Medvedev S. V., Ivanec G. G. The methodology for calculating power in the LS-DYNA software environment through instantaneous values of cutting forces and speeds during wood milling. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forest and Woodworking Industry, 2018, pp. 290–295 (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). E-mail: medv@newman.bas-net.by

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

#### Information about the authors

**Rapovets Vyacheslav Valeryevich** – 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** – DSc (Engineering), Head of the Laboratory. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: medv@newman.bas-net.by

**Klepatski Ihar Kazimirovich** – PhD 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

Поступила 12.03.2020