

УДК 621.914:674:004

В.В. Раповец, А.А. Гришкевич
(БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь);

С.В. Медведев, Г.Г. Иванец
(ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь), slavyan_r@mail.ru

**МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ В ПАКЕТЕ LS-DYNA**

**THE METHODOLOGY OF MODELING DURING MACHINING
OF WOOD MATERIALS BY MILLING IN THE SOFT LS-DYNA**

В статье изложены особенности процессов высокоскоростной механической обработки древесных материалов, представлены условия и область применения методики моделирования, обобщенной (ALE), гидродинамической, с использованием SPH-элементов, в пакете LS-DYNA, исходя из формулировок Лагранжа, Эйлера

The article describe the features of high-speed machining of wood materials, presents the conditions and the scope of the modeling technique, the generalized (ALE) hydrodynamics using SPH-elements in the package LS-DYNA, based on the formulations of Lagrange and Euler.

К настоящему времени в Республике Беларусь для механической обработки различных древесных материалов и древесины используется в основном импортный дереворежущий инструмент. Постоянное увеличение номенклатуры обрабатываемых материалов на основе древесины, интенсификация условий работы деревообрабатывающего оборудования требует оптимизации конструкций применяемых режущих инструментов и 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 (время взаимодействия режущей кромки инструмента с материалом менее 0,001 с). Высокие частота вращения режущих инструментов (до 40000 мин⁻¹) и скорость подачи (более 80 м/мин) при обработке материалов требуют применения дорогостоящей высокоточной измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Ранее установлено, что в контактной области при резании древесных материалов возникают деформационные нагрузки до 2,5 кН, высокие температуры до 1200 К, которые в значительной степени зависят от конструкции инструмента и технологических режимов его эксплуатации. Такие нагрузки и температура способствуют интенсивному разрушению поверхностного слоя дорогостоящего инструмента, что приводит к быстрой потере им режущей способности, а в некоторых случаях и к полному его разрушению без возможности восстановления.

Для оптимизации конструкторско-технологических параметров режущего инструмента, разработки методов расчета основных показателей (силовых, параметров износа и т.д.) процесса высокоскоростной механической обработки древесных материалов в настоящее время проводятся дорогостоящие лабораторные и промышленные исследования, связанные с длительностью протекания эксперимента и дальнейшей трудоемкой обработкой большого массива полученных 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 возможно применение различных описаний сплошной среды: Лагранжевого, Эйлеравого или обобщенного на основе Лагранжево–Эйлерова описания (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. Формулировка Лагранжа используется в основном для моделирования твердых тел. В данной формулировке упрощается наложение граничных условий, так как граничные узлы всегда совпадают с границами материала. Основным недостатком является возможность получения неточных результатов, так как в случае, если материал имеет возможность больших деформаций, следовательно, и сетка будет деформироваться настолько сильно, что это приведет к неадекватности расчетов, как показано на рисунке 1.

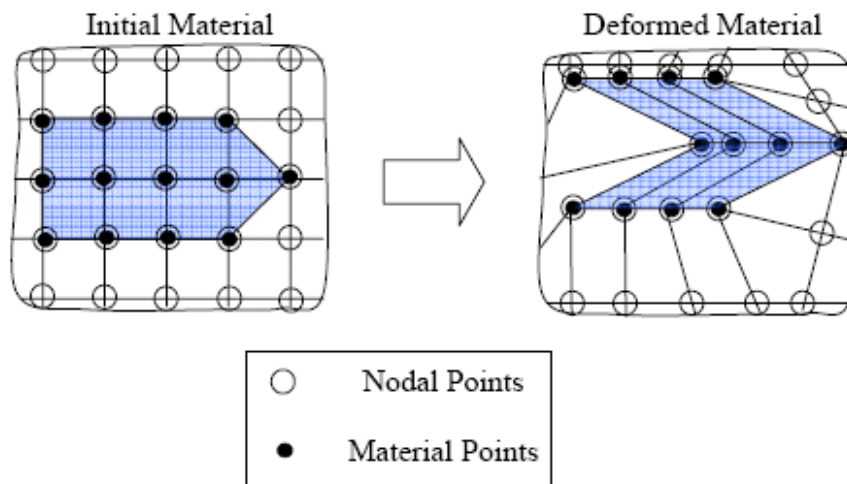


Рис. 1. Схема деформации расчетной сетки по методу Лагранжа

Несмотря на указанный недостаток, моделирование с формулировкой Лагранжа применяется достаточно широко в практике конечно-элементных расчетов для исследования процесса формирования стружки [1–5].

В формулировке Эйлера узлы сетки остаются в фиксированном положении, а материал при моделировании течет через сетку (рис. 2). Метод Эйлера применяется в основном для моделирования жидкостей, но может применяться и для создания моделей твердых тел.

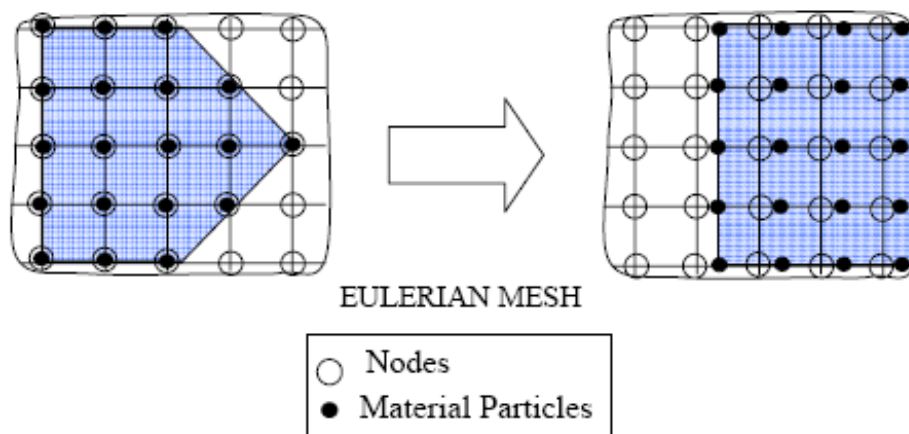


Рис. 2. Постановка задачи по методу Эйлера

Формулировка Эйлера широко применяется для определения температур в зоне резания [6]. Практически моделируется только первоначальный момент формирования стружки (0,015 с), как видно из рисунка 3, из-за больших потребностей в вычислительных ресурсах.

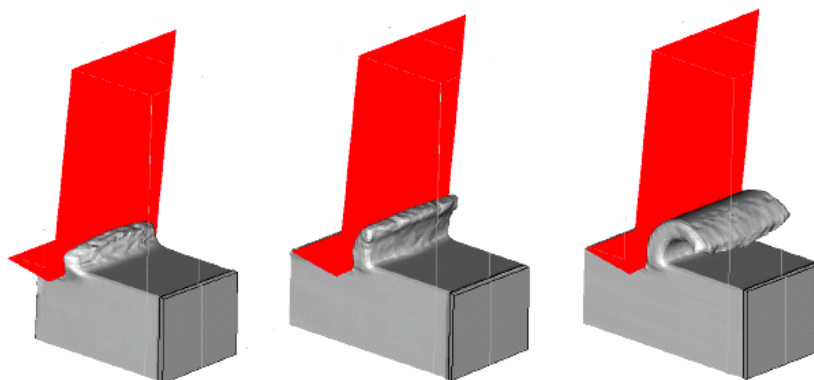


Рис. 3. Моделирование процесса образования стружки в формулировке Эйлера

Обобщенная постановка Arbitrary Lagrange–Eulerian (ALE) является комбинацией вышеприведенных двух постановок. В ALE-постановке пользователь сам определяет движение сетки с целью минимизации ее искажений. Поэтому для данной формулировки требуется высокий уровень пользователя. Исследования по моделированию процессов механической обработки материалов фрезерованием в ALE-формулировке проводятся французскими учеными [7] (рис. 4).

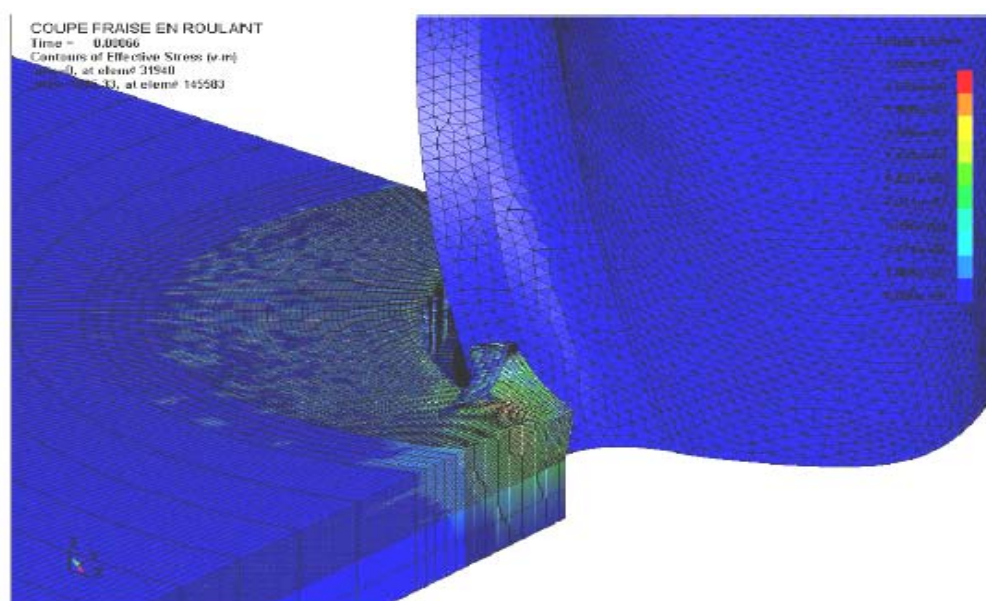


Рис. 4. Моделирование процессов механической обработки материалов фрезерованием в ALE-формулировке

К гидромеханическому виду модели относится формулировка задачи с использованием гладких частиц Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). SPH-элементы рассматриваются как центры масс объемных элементов. С помощью коэффициентов материала и характеристик SPH-элементов в граничных условиях описывается поведение вязкой среды, в которой находятся точки, обладающие заданной массой. В отличие от модели с твердотельным представлением, в модели, основанной на SPH-элементах, допускается большое относительное перемещение узлов друг относительно друга.

Известны исследования при механической обработке материалов со стружкообразованием (рис. 5) и применение таких моделей датскими учеными [8].

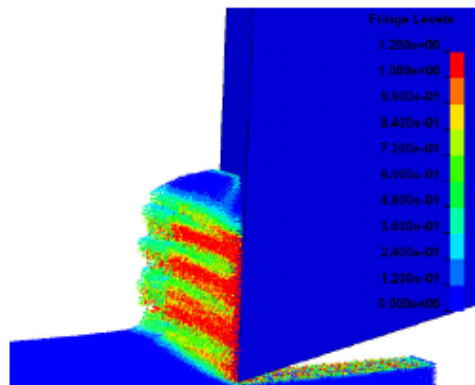


Рис. 5. Моделирование стружкообразования с использованием SPH-элементов

Недостаток формулировок Эйлера, ALE, гидродинамической с использованием SPH-элементов состоит в том, что они позволяют моделировать непродолжительные промежутки времени процесса резания. Поэтому для задач, в которых требуется исследовать процесс обработки заготовки в целом, например, обработку заготовки на станке с ЧПУ, концевой фрезой с пластическими деформациями в зоне резания [8], применяется Лагранжевая формулировка задачи с удалением элементов с поверхностей объектов, взаимодействующих друг с другом за счет применения карты CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE (рис. 6).

LS-DYNA KEYWORD DECK BY LS-PREPOST
 Time = 0.0025
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=0, at elem# 1
 max=0.174201, at elem# 7299

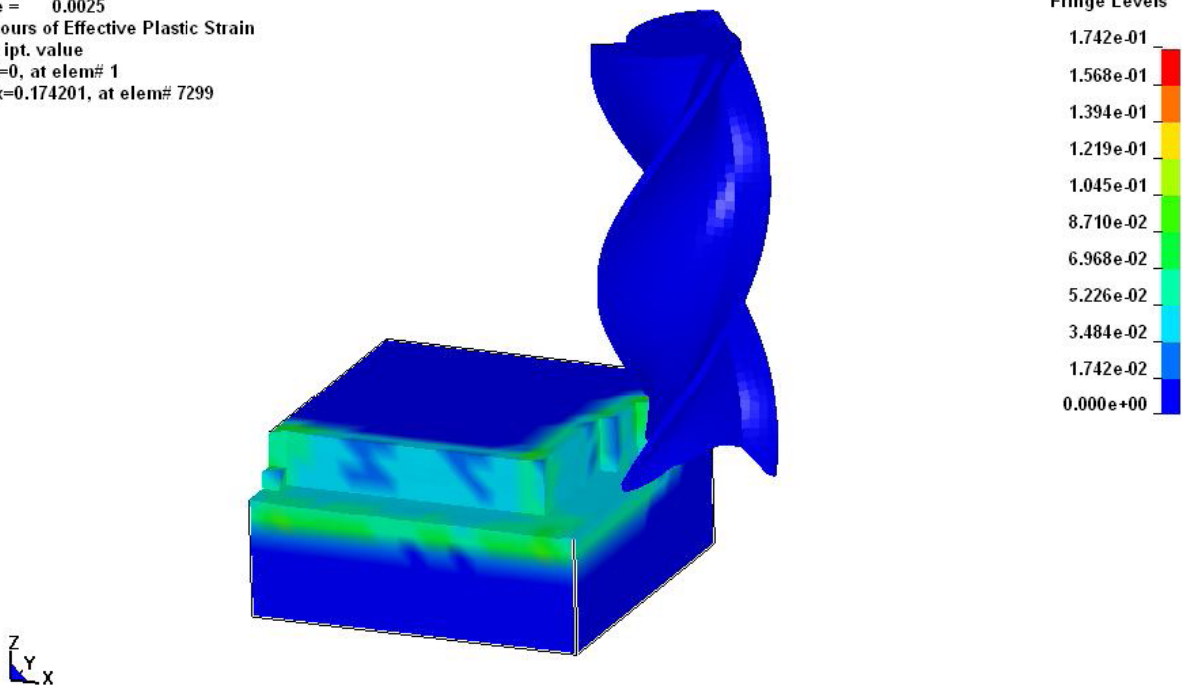


Рис. 6. Схема пластических деформаций в зоне резания концевой фрезой

Общая расчетная схема методики моделирования процесса фрезерования материала концевым режущим инструментом, представленная в работе [8], показана на рисунке 7.

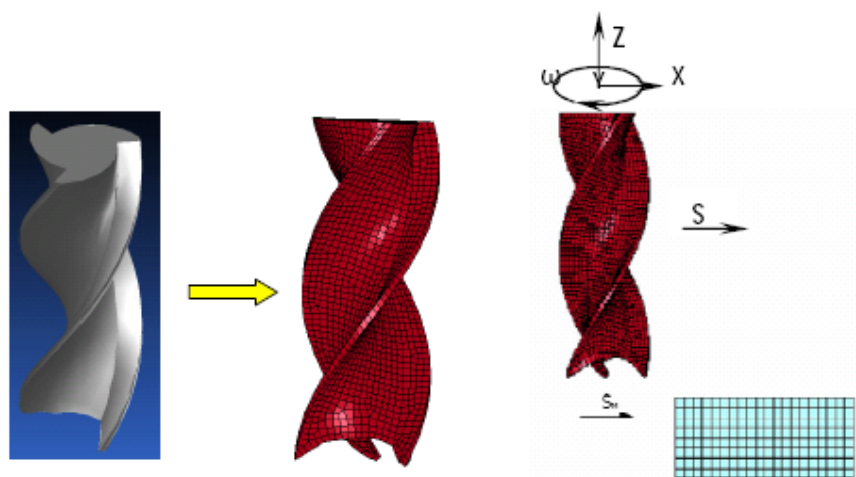


Рис. 7. Общая расчетная схема методики моделирования процесса фрезерования материала концевым режущим инструментом

Согласно представленной методике подготовка расчетной модели состоит из последующих этапов:

- в CAD-системе создается геометрическая модель режущего инструмента;
- на основе созданной геометрической модели генерируется конечно-элементная сетка;
- конечно-элементная модель заготовки строится в пакете LS-PrePost;
- задаются режимы резания с помощью карт граничных условий;
- определяются коэффициенты математической модели процесса резания с помощью карт материала и карт контактов.

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.

При исследовании конечно-элементной модели поведение системы «инструмент–заготовка» может изменяться, как показано в расчетной схеме, путем ввода вспомогательного инструмента (рис. 8).

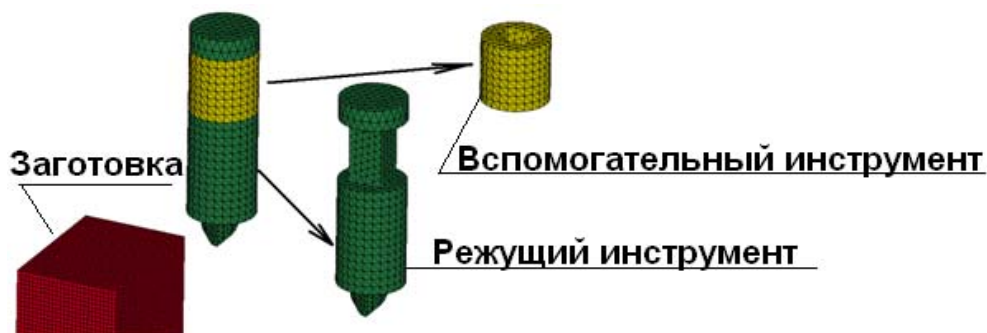


Рис. 8. Конечно-элементная модель системы «инструмент–заготовка»

В предложенной расчетной схеме абсолютно жестким является вспомогательный инструмент. Законы поступательного и вращательного движения задаются для вспомогательного инструмента. Режущий инструмент в этом случае описывается картой с параметрами, определяющими физические свойства материала режущей части. Простейшей является карта для материала *MAT_ELASTIC (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона).

Движение вспомогательного инструмента фрезе передается через контакт, заданный картами *CONTROL_CONTACT и *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID.

Фиксация заготовки в приспособлении задается путем определения набора неподвижных узлов (например, дна заготовки) и карты *BOUNDARY_SPC_SET.

Важным моментом является определение математической модели, по которой происходит расчет состояния системы «режущий инструмент–заготовка» (модель материала заготовки, модель контакта). В литературном источнике [8] в качестве материала заготовки была выбрана модель PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Данный тип материала – эластично-пластичный. Он учитывает напряжения и деформации, возникающие в материале при силовом нагружении. Система позволяет задать условия разрушения материала в зависимости от пластических деформаций или временной функции. В случае отсутствия данных по физико-механическим свойствам материалов можно использовать модель *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, подобрав вычислительным путем значения коэффициента FS (деформацию разрушения для элементов). Значения коэффициентов E (модуля упругости), sigy (предела текучести), etan (касательного модуля) берутся из технических справочников механических свойств материалов. Условия контакта инструмента с металлом определяются картой CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE. После подготовки исходного key-файла выполняется расчет в пакете LS-DYNA.

Выводы

Рассмотренные методики моделирования процессов в пакете LS-DYNA с формулировками Лагранжа, Эйлера, обобщенной ALE, гидродинамической с использованием SPH-элементов имеют свои отличительные особенности и область 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.

Библиографический список

1. Ceretti E. 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. – Pp. 169–180.
2. Marusich T.D. Modelling and simulations of high-speed machining / T.D. Marusich, M. Ortiz // International journal for numerical methods in engineering. – 1995. – Pp. 3675–3694.
3. 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. – Pp. 545–554.
4. Zhang B. Finite element simulation of chip formation and comparasion with machining experiment / B. Zhang, A. Baghi // Journal of engineering for industry. – 1995. – Pp. 289–297.

5. Kompovopoulos K. Finite element modelling of orthogonal metal cutting / K. Kompovopoulos, S.A. Erpenbeck // Journal of engineering for industry. – 1991. – Pp. 253–267.

6. Raczy A. An eulerian finite element model of the metal cutting process / A. Raczy [et. al.] // 8th International LS-DYNA users conference. – URL: <http://www.dynalook.com/international-conf-2004/09-2.pdf>.

7. Experiments and FEM simulations of milling performed to identify material parameters / A. Maurel, M. Fontaine, S. Thibaud1 [et. al.] // Proceedings of the 11th ESAFORM conference on material forming, Lyon (France), 23–25 April 2008.

8. Медведев Ф.В. Моделирование динамики концевое фрезерования / В.Ф. Медведев, Б.Б. Пономарев, Е.А. Черемных. – URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Ptsm/2009_38/139-142.pdf.

УДК 674.053

И.Т. Рогожникова, В.И. Сулинов, В.Г. Новоселов, Т.В. Полякова
(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ), nauka-les@yandex.ru

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАССИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

TO CALCULATION OF PRODUCTIVITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEM OF CALIBRATION OF PRODUCTS FROM NATURAL WOOD

В статье приведена методика и результаты расчетов производительности технологической системы калибрования деревянных изделий. Показана существенная зависимость производительности от толщины снимаемого слоя.

The technique and results of calculations of productivity of technological system of calibration of wooden products is given in article. Essential dependence of productivity on thickness of the removed layer is shown.

Операция калибрования является финишной в механической обработке изделий из массивной древесины, обеспечивающей постоянный размер по толщине и одинаковый уровень шероховатости поверхности деталей (ламелей) при изготовлении, например, клееных щитов. Разнотолщинность отдельных деталей по нормам точности на станки фрезерной группы может достигать до 0,2 мм [1], а шероховатость поверхности по параметру – среднее арифметическое высот наибольших неровностей $R_{m \max}$ – до 250 мкм [2]. Очевидно, что эти два фактора будут определять толщину слоя древесины, снимаемого в процессе операции калибрования изделия, которая, в свою очередь, окажет влияние на производительность данной технологической системы, состоящей из средства технологического оснащения – цилиндрического шлифовально-калибровального станка, обрабатываемого изделия – клееного щита и исполнителя – станочника деревообрабатывающих станков.

Как показали наши исследования [3, 4], в процессе фрезерования при остром лезвии инструмента происходит перерезание волокон древесины с минимальными неровностями разрушения, мшистостью и ворсистостью получаемой поверхности. В дальнейшем из-за затупления лезвий происходит смятие и разрыв волокон древесины и увеличение шероховатости обработанных поверхностей. Кроме этого, из-за укорочения радиуса поверхности резания происходит изменение размеров получаемых деталей.