

РЕФЕРАТ

Отчет 72 с., 37 рис., 8 табл., 13 источн., 2 прил.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ, ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РЕЗАНИЕ, ДРЕВЕСИНА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ, ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ, ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ, СТАНОК С ЧПУ

Объектом исследований являются методики виртуального моделирования процесса фрезерования анизотропного материала в высокопроизводительных вычислительных средах.

Основной целью проводимых исследований в рамках данной работы является разработка расчетных моделей фрезерования анизотропного материала с высокой детализацией для моделирования в высокопроизводительной вычислительной среде и оптимизация режимов резания анизотропного древесного материала фрезерным инструментом по разработанным моделям в вычислительной среде.

Метод проведения работы – в процессе выполнения работы был проведен анализ и выбор средств, используемых для моделирования в высокопроизводительных вычислительных системах, экспериментальным путем на станке с числовым программным управлением Biesse Rover B 4.35 определены выходные параметры режимов механической обработки древесины сосны фрезерованием и оптимизированы посредством разработанных математической модели и робастного метода.

Результаты работы и их новизна – разработана конструкторская документация БГТУ-Н 2100804, по которой изготовлен и испытан для реализации экспериментов новый дереворежущий фрезерный инструмент с наноразмерной вставкой из тугоплавкого износостойкого материала, обеспечивающей в процессе работы эффект самозатачивания; сформирована база характеристик процесса резания от технологических режимов обработки древесины по совместным результатам натуральных и вычислительных в пакете LS-DYNA экспериментов; разработана методика проведения вычислительных экспериментов, геометрические и конечно-элементные модели выбранного типа прогрессивного фрезерного инструмента и обрабатываемого материала с высокой детализацией и использованием механизма дискретных частиц, позволяющие моделировать сложные процессы термодинамического износа инструмента. Разработана специальная математическая модель и метод робастной оптимизации и адаптивного управления параметрами технологических процессов высокоскоростной лезвийной обработки древесных материалов на базе экспериментальных зависимостей характеристик процесса от его параметров. Для задачи многокритериальной оптимизации параметров режимов технологических процессов деревообработки предложен метод повышения надежности решения, основанный на

построении вогнутых (либо выпуклых) оболочек экспериментально получаемых характеристик процесса в зависимости от знака неравенства, включающего характеристику.

Рекомендации по внедрению результатов НИР – совершенствование предложенных методики, математической модели и робастного метода оптимизации, освоение их специалистами деревообрабатывающих производств и проектных организаций позволяют оптимизировать технологические процессы и разрабатывать дереворежущий инструмент с повышенными эксплуатационными свойствами и ресурсом, а также повысить надежность вырабатываемых рекомендаций по выбору параметров режимов обработки новых материалов при отсутствии наработанной экспериментальной базы. Результаты исследований являются основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесины и древесных материалов при нахождении значимых выходных параметров для предприятий деревообрабатывающей промышленности, Министерства лесного хозяйства.

Область применения – результаты проведенных исследований при моделировании и оптимизации высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов могут использоваться на ОАО «Речицадрев», ЗАО «Молодечномобель», ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев», ОАО «Борисовский ДОК» и других деревообрабатывающих предприятиях отрасли для оптимизации технологических процессов, режимов эксплуатации эффективного фрезерного инструмента на современных деревообрабатывающих станках.

Экономическая эффективность работы заключается в снижении стоимости и длительности проведения натурных экспериментов за счет моделирования процесса резания в высокопроизводительных вычислительных системах и оптимизации технологических параметров обработки древесины и древесных материалов.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – полученные результаты выполнения НИР могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволят существенно повысить эффективность действующего производства.

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 совершенствования и оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования 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. 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 натурных экспериментов за счет моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов при механической обработке фрезерным инструментом с применением суперкомпьютерных вычислительных технологий является актуальной задачей. При моделировании процессов фрезерования важно учитывать влияние различных неопределенных факторов, в том числе флуктуации физико-механических свойств обрабатываемых древесных материалов, их анизотропию. Методы оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования древесины и древесных материалов с использованием полученных закономерностей должны обеспечивать требуемые характеристики производительности, себестоимости, энергоемкости и качества продукции и быть устойчивыми к влиянию неопределенных факторов.

Выполняемая НИР соответствует одному из приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190: 5. Информатика и космические исследования.

Для проведения запланированных научно-исследовательских работ имеется необходимое технологическое оборудование, измерительное, приборное и программное обеспечение. Кафедра деревообрабатывающих станков и инструментов БГТУ имеет уникальные специализированные научные лаборатории резания древесины, оснащенные современным оборудованием и

контрольно-измерительными приборами из Германии, Италии, Японии, Чехии, Российской Федерации и др. Совокупность используемых методов исследований и высокая квалификация специалистов коллектива, выполняющего задание 1.8.15, позволяет комплексно изучать и решить поставленные научные задачи.

Учету неопределенностей в моделях оптимизации посвящена обширная литература [1-6]. Поскольку в реальных задачах оптимизации данные обычно неточны, в результате точно неизвестно, когда решение найдено. При традиционном подходе «небольшая» (доли процентов) неопределенность данных просто игнорируется, и проблема решается так, как если бы номинальные данные (предположения относительно фактических данных) были идентичны фактическим данным [4]. Однако эксперименты показывают, что уже довольно небольшие возмущения неопределенных данных могут привести к тому, что номинальное (т.е. соответствующее номинальным данным) оптимальное решение в значительной степени неосуществимо и, следовательно, практически бессмысленно. Например, в 13 из 90 задач линейного программирования из библиотеки NETLIB 0,01 % случайных возмущений неопределенных данных приводят к более чем 50 % нарушениям правых частей некоторых ограничений, оцениваемых при номинальных оптимальных решениях [2,3]. Таким образом, в приложениях существует реальная потребность в методологии, которая дает *робастные* (т.е. надежные) решения, обладающие «иммунитетом» против неопределенности исходных данных.

Традиционная методология этого типа предлагается стохастическим программированием, при котором, возмущениям данных в заданной области назначается распределение вероятностей и исходные ограничения заменяются их «случайными версиями», налагающими на возможное решение требование удовлетворять ограничениям с вероятностью $\geq 1-\varepsilon$, где $\varepsilon \ll 1$ является заданным допуском [4]. Однако во многих случаях, даже если известна область возможных значений, нет естественного способа присвоить возмущениям данных распределение вероятностей; кроме того, вероятностное стохастическое программирование обычно трудноразрешимо с вычислительной точки зрения.

Робастную оптимизацию можно рассматривать как дополнение к подходу стохастического программирования к решению проблем оптимизации с неопределенными данными. Как правило, в робастных моделях предполагается, что неопределенность исходных данных описывается известной ограниченной областью значений. При этом на возможное решение налагается требование быть *робастно допустимым*, т.е. удовлетворять ограничениям независимо от реализации данных из этой области. Предполагается, что целевая функция определена точно (т.е. на нее не влияют возмущения данных, фактически,

это предположение не ограничивает общности постановки задачи), затем ищется робастное оптимальное решение – робастное допустимое решение с наименьшим значением целевой функции. При таком подходе с исходной неопределенной задачей ассоциируется ее робастный аналог – задача построения робастного оптимального решения. Впервые подход робастной оптимизации был сформулирован в работе Сойстера [6] и в дальнейшем развит в работах Бен-Тала и Немировского [1–5] и других авторов.

Однако, для ряда практических задач, в частности, оптимизации процессов обработки новых древесных материалов новыми типами режущих инструментов отсутствует наработанная экспериментальная база, позволяющая достоверно оценить не только номинальные значения, но и границы диапазонов возможных значений исследуемых характеристик технологического процесса для различных значений его параметров. В результате, возникает проблема повышения надежности (робастности) принимаемых проектных решений при использовании имеющихся неточных экспериментальных данных о зависимости характеристик процесса (усилие, мощность резания, степень износа инструмента) от параметров режимов (скорости резания, толщины снимаемой стружки) и времени обработки, с учетом ограничений на значения этих характеристик, вытекающих из требований к качеству обработки.

Предлагаемый для таких ситуаций робастный подход основан на предположениях: а) экспериментальные значения характеристик процесса определяются с погрешностями, б) границы области неопределенности характеристик не определены. Подход заключается в учете типа ограничения (\leq либо \geq) на характеристику и, исходя из этого типа, соотнесения экспериментальному значению сравнительной степени риска нарушения ограничения в зависимости от его величины (для ограничения \leq более вероятным является большее значение характеристики). Последнее основано на свойстве, что риск превышения значения характеристики (для близких по аргументам экспериментальных точек) уменьшается с ростом ее значения. Практически, для ограничений типа \leq экспериментальные значения характеристики в левой части неравенства, которые не принадлежат вогнутой оболочке экспериментальных характеристики (для 2-мерного случая – вогнутой поверхности), отбрасываются либо корректируются в сторону увеличения так, чтобы они ей принадлежали.

Построение такой выпуклой оболочки для описания зависимости характеристики от параметров режимов позволяет интерполировать вероятные максимальные значения исследуемой характеристики для промежуточных (экспериментально не исследованных) значениях параметров режимов. Аналогично, для ограничения типа \geq строится выпуклая оболочка (вогнутая вниз гиперповерхность).

Для сформулированной ранее (см. отчет за 2018 год) модели оптимизации технологических процессов деревообработки резанием предложена ее робастная модификация, в которой одна из основных характеристик (мощность резания) рассматривается, как неточно определяемая по результатам экспериментов вследствие воздействия на нее неопределенных факторов. Причем, в связи с большим разнообразием свойств обрабатываемых материалов и недостаточным количеством проведенных экспериментов отсутствуют характеристики области неопределенности исследуемой характеристики для используемых значений параметров технологического процесса.

Целью такого моделирования является повышение устойчивости оптимальных (по выбранным критериям) параметров технологического процесса по отношению к неопределенности исследуемой характеристики. Рассмотрен подход к модификации экспериментальных данных исследуемой характеристики, основанный на построении ее вогнутой оболочки по результатам экспериментов с учетом типа ограничений на ее значения в задаче оптимизации. Разработан алгоритм построения указанной вогнутой оболочки по результатам экспериментов, который программно реализован для случая зависимости функции мощности от двух переменных параметров режимов (толщины снимаемой стружки и скорости резания). Проведены тестовые расчеты на базе натуральных экспериментов для различных сочетаний параметров припуска при фрезеровании и угла между обрабатываемой поверхностью и задней кромкой фрезы, когда управляемые параметры процесса изменяются в заданных диапазонах.

Для достижения поставленной цели в выполняемой работе необходимо было решить следующие задачи:

- разработать корректные геометрические и конечно-элементные модели выбранного типа прогрессивного фрезерного инструмента; выявить приемлемые способы представления в вычислительных экспериментах анизотропии древесных материалов;

- сформировать обоснованные граничные условия суперкомпьютерных предварительных расчетов и выполнить пробные вычислительные эксперименты, скорректировать при необходимости исходные данные, свойства материалов и параметры дискретных частиц;

- подготовить лабораторную экспериментальную машину и обрабатываемый материал для проведения натуральных исследований, настроить и наладить измерительную и регистрирующую аппаратуру;

- провести лабораторные эксперименты для получения зависимостей характеристик процесса резания (мощность резания, период стойкости инструмента, радиус округления режущей кромки лезвия и др.) от технологических режимов обработки на границах диапазонов варьирования исследуемых переменных факторов;

– провести серию вычислительных экспериментов с различными параметрами режима резания и свойствами древесного материала;

– описать математическая модель робастной оптимизации параметров технологических процессов высокоскоростной лезвийной обработки древесных материалов на базе неточных экспериментальных зависимостей характеристик процесса от его параметров;

– разработать метод робастной многокритериальной оптимизации режимов деревообработки на основе неточных экспериментальных данных;

– проанализировать результаты численных экспериментов с программным обеспечением, реализующим разработанные алгоритмы робастной многокритериальной оптимизации параметров процесса обработки древесных материалов, для реального примера процесса фрезерования;

– оформить заключительный отчет.

Решение этих задач позволит успешно выполнить данную научно-исследовательскую работу.