

УДК 53.072: 621.9.01

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В САЕ-СИСТЕМАХ

© 2013 И.В. Горбунов, И.В. Ефременков, В.Л. Леонтьев, А.Р. Гисметулин

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 26.09.2013

В статье проведены сравнение и оценка возможностей инженерных программных пакетов, предназначенных для компьютерного моделирования физических процессов механической обработки. Даны рекомендации по их применению и оптимизации процесса технологической подготовки производства с помощью САЕ систем.

Ключевые слова: САЕ-система, DEFORM, ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN, ADVENTEDGE, моделирование процессов механической обработки, композиционные материалы, компьютерная модель, оптимизация, технологическая подготовка производства.

ВВЕДЕНИЕ

Механическая обработка остаётся основным видом формообразования деталей. Высокие требования к точности, шероховатости и качеству поверхности, приводят к необходимости совершенствования технологии обработки и подготовки производства, особенно при обработке деталей из композиционных материалов.

При проектировании новых технологических процессов оптимизация параметров обработки производится, как правило, эмпирическим путём. Это приводит к увеличению времени и затрат на проектирование технологических процессов. При механической обработке композиционных материалов задача дополнительно усложняется – свойства таких материалов зависят от геометрии конструкции детали, и параметры режимов обработки различаются в зависимости от структуры композиционного материала.

Эффективность проектирования технологического процесса производства можно повысить, используя моделирование процессов обработки в пакетах программ для инженерных расчётов (САЕ системах). Большинство САЕ систем яв-

ляются универсальными и не имеют в своём составе специальных шаблонов для моделирования механообработки. Для моделирования механообработки в данных программных средствах необходимо разработать рекомендации по моделированию процессов резания, направленные на упрощение процедур моделирования и увеличение точности компьютерной модели. Создание таких моделей позволяет получать данные о деформациях, напряжениях, температуре, распределении величин сил резания в зоне обработки.

Анализ полученных результатов даёт возможность подбирать оптимальные режимы резания и геометрию инструмента с точки зрения повышения стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности. Таким образом, на основе САЕ системы можно создать инструмент для проектирования и автоматизации процесса технологической подготовки производства. С одной стороны такой инструмент должен обладать возможностью моделирования процесса механообработки и его оптимизации. С другой стороны – должен быть адаптирован для производства – быть простым в освоении и использовании.

САЕ-СИСТЕМЫ

В настоящее время существует большое количество программных средств конечно-элементного анализа, как специализированных в области моделирования механообработки, такие как **DEFORM**, **ADVENTEDGE**, так и универсальных, способных решать данную задачу – **ABAQUS**, **LS-DYNA**, **ANSYS**, **AUTODYN** и другие. Каждая система обладает своими преимуществами и недостатками. Для сравнения возможностей САЕ-систем, применительно к задаче моделирования процессов механообработки, были выбраны такие продукты: **DEFORM**, **ANSYS Workbench**

Горбунов Игорь Вадимович, аспирант кафедры математического моделирования технических систем, младший научный сотрудник центра CALS-технологий.

E-mail: GorbuinovIV@ulsu.ru

Ефременков Иван Валерьевич, аспирант кафедры математического моделирования технических систем, младший научный сотрудник центра CALS-технологий.

E-mail: kikurato@yandex.ru

Леонтьев Виктор Леонтьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического моделирования технических систем.

E-mail: LeontievVL@ulsu.ru

Гисметулин Альберт Растемович, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования технических систем. E-mail: GismetulinAR@yandex.ru

(модуль *Explicit Dynamics*) и *LS-DYNA*. Выбор данных продуктов обусловлен необходимостью учесть как можно большее число особенностей систем конечно-элементного анализа.

Общие принципы моделирования процессов механообработки в CAE системах включают:

- Выбор вида заготовки, определение припусков на обработку и размеры заготовки. Выбор операции, а также приспособлений и режущего инструмента. Проектирование геометрии режущего инструмента и заготовки. Расположение созданных объектов в пространстве относительно друг друга. Выбор материалов для заготовки и инструмента.

- Выбор режимов резания (глубина резания, подача, скорость резания). Создание дополнительных условий (гравитация, температура окружающей среды и другие).

- Моделирование тепловых процессов и напряженно-деформированных состояний (упругих и пластических).

- Учёт в модели трения скольжения между инструментом, заготовкой и стружкой.

ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Можно выделить несколько этапов моделирования механообработки, имеющих свои особенности в различных CAE системах:

- создание геометрии;
- задание материалов;
- задание композиционного материала;
- наложение сетки;

- задание граничных и начальных условий;
- вывод и анализ результатов.

СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ

Геометрия объектов технической системы, особенно геометрия инструмента, очень сильно влияет на физику процесса резания. Поэтому значение данного этапа в моделировании механообработки очень высоко.

В *ANSYS Workbench* создание геометрии осуществляется в модуле *DesignModeler*, который позволяет строить геометрические модели с использованием стандартных операций (*Extrude*, *Revolve* и другие). Большинство препроцессоров для решателя *LS-DYNA* также имеют в своём составе операции построения геометрии.

Специализированные CAE-системы, в отличие от универсальных, зачастую имеют слабый по возможностям моделирования геометрии CAD-модуль. Например, для создания геометрических объектов в *DEFORM* используются модули генерации твердотельных объектов-примитивов (призма, цилиндр) и генерации твердотельной модели спирального сверла (рис. 1). Работа данных модулей заключается в автоматизированном создании геометрической модели объекта на основе размеров и углов, заданных пользователем.

Кроме этого, все программные продукты конечно-элементного анализа имеют возможность импорта геометрии из файлов данных отдельных CAD-систем. Такие системы как *ANSYS* или *ABAQUS* позволяют не только использовать гео-

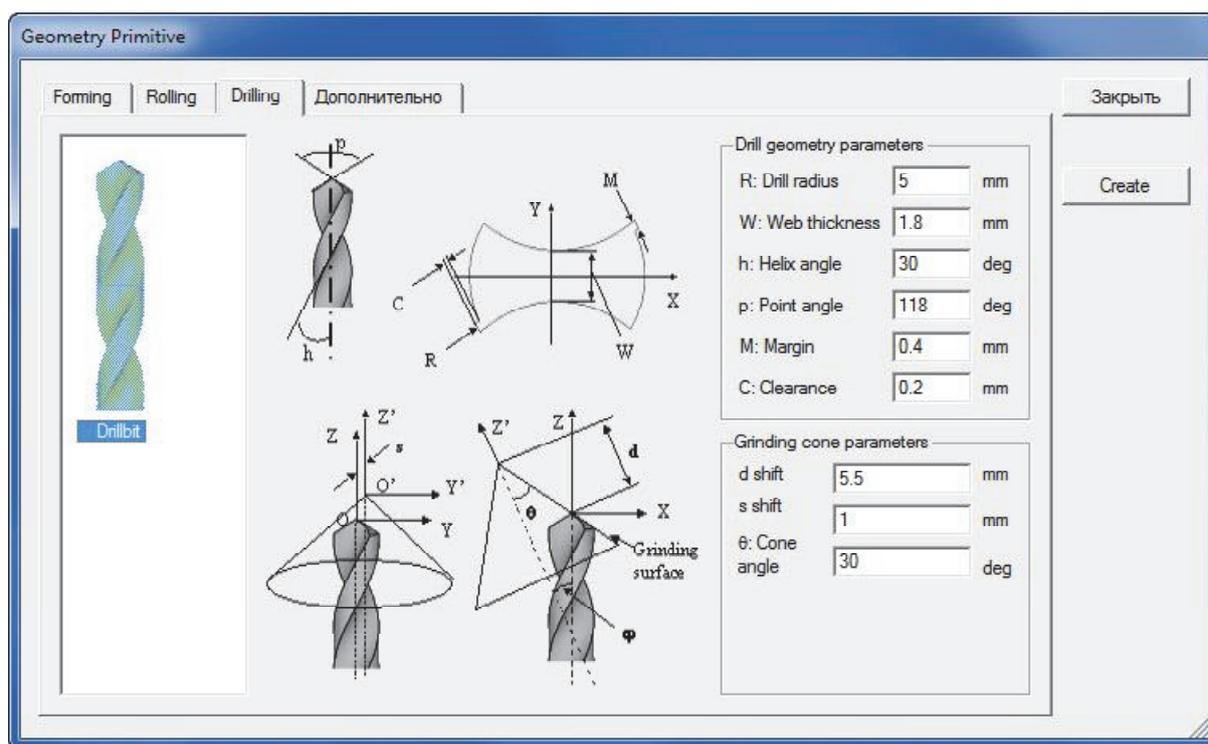


Рис. 1. Окно задания параметров геометрии спирального сверла в DEFORM

метрию стандартных форматов (**IGES**, **STEP**, **PARASOLID**), но и геометрию «родных» файлов САД-систем (например, **NX** или **CATIA**). Но для импорта геометрии рекомендуется использовать файлы стереолитографии (**STL**) – данный формат файлов стандартен, и он поддерживается как универсальными, так и специализированными САЕ-системами.

Для оптимизации процессов механообработки необходимо создавать геометрическую модель с помощью инструмента параметризации (например, как в системе **DEFORM**). Параметризация геометрической модели различных типов инструментов и заготовок позволит значительно упростить проектирование процессов технологической подготовки производства.

ЗАДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Главным преимуществом **DEFORM** и **ANSYS Workbench**, по сравнению с другими САЕ-системами, являются большие библиотеки материалов с возможностью редактирования физических свойств существующих материалов и создания новых. Библиотека **DEFORM** больше библиотеки **ANSYS Workbench** по количеству материалов, особенно, используемых при механообработке, но **ANSYS Workbench** содержит гибкую систему задания свойств материалов. Это позволяет создавать всевозможные материалы с различными видами и типами физических свойств (рис. 2).

Отличительной особенностью **LS-DYNA** является то, что в данной системе не существует библиотеки материалов. Вместо этого, существует возможность выбора типа материала с заданными параметрами из более чем 260 типов. Это позволяет создавать модели материалов с минимумом известных параметров, такими как плотность, текучесть, модуль Юнга и другими.

Для моделирования процессов механообработки в среде **LS-DYNA** рекомендуется использовать следующие типы материалов:

- **Plastic_Kinematic** – тип материала, характеризующийся минимумом параметров реализации тепловых процессов и напряжённо-деформированного состояния (упругого и пластического). Такими параметрами являются значения плотности материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести и тангенциальный предел упругости.

- **Rigid** – тип недеформированного материала с заданием его плотности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона. Удобство этого типа материала состоит в том, что в его свойствах указываются ограничения на перемещения по 6 степеням свободы.

- **Elastic_Plastic_Thermal** – тип материала, в котором указывается плотность всего материала и 8 показателей температуры, для каждого из которых, указывается свой модуль Юнга, коэффициента Пуассона и предел текучести.

При использовании **ANSYS Workbench** или **DEFORM** следует удостовериться, что заданные свой-

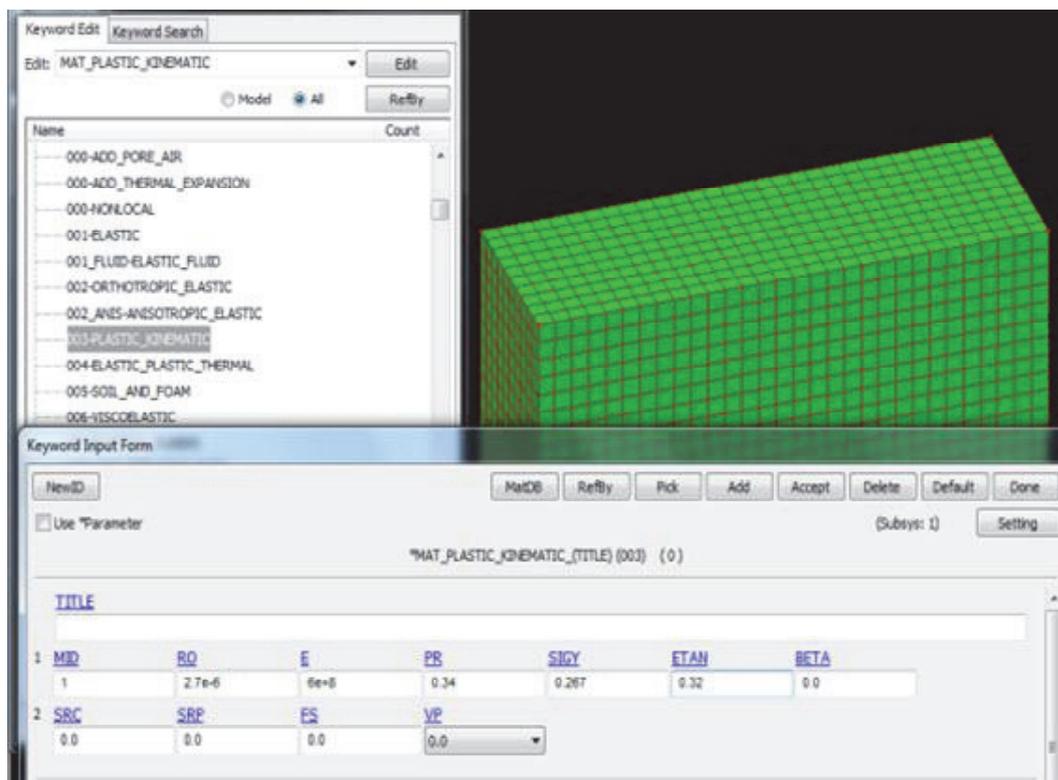


Рис. 2. Окно задания типа материала и его свойств в LS-DYNA

ства материала достаточны для данной модели, иначе пользователю необходимо будет добавить новые параметры в материалы, взятые из библиотеки.

ЗАДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Композиционный материал является материалом со сложной внутренней структурой. Его технологические свойства зависят от большого числа факторов, некоторые из которых не присущи изотропным материалам (количество слоёв в материале, направление выкладки волокон и другие) и в настоящее время такие материалы широко используются в технике. Механическая обработка таких материалов гораздо сложнее традиционных. Поэтому возможность моделирования резания такого материала является одним из критериев сравнения CAE систем.

Благодаря большому количеству типов моделей материала, **LS-DYNA** позволяет задавать анизотропные свойства композита (типы материалов **Composite Damage** и **Composite Direct**). Но в отличие от других систем, **LS-DYNA** не обладает удобным инструментом по созданию слоёв, из которых состоит материал.

В **ABAQUS** композиционный материал задаётся послойно с указанием толщины и направления выкладки слоёв. Похожий инструмент имеется в составе **ANSYS – CompositePrePost**. Он позволяет задавать композиционный материал, как в твердотельных, так и в поверхностных моделях, имеет возможность задания разных типов материала (однонаправленные волокна, плетения, соты и другие), позволяет осуществлять драпировку.

Необходимо отметить, что пластические и упругие свойства ортотропного материала задаются различными по трём ортогональным направлениям. Поэтому, даже в тех системах конечно-элементного анализа, в которых можно задавать некоторые анизотропные свойства, не всегда можно создать полноценный композиционный материал. Типичным примером является **DEFORM** – упругие свойства материалов в данной системе могут быть только изотропными, а наличие коэффициента Ланкфорда недостаточно для задания необходимых анизотропных пластических свойств.

Для оптимизации процессов механообработки необходимо задавать композиционный материал используя библиотеку препрегов или армирующих и связующих компонентов с указанием направления выкладки слоя.

НАЛОЖЕНИЕ СЕТКИ

Построение сетки является важным этапом в моделировании. От этого зависит общая точность модели и время расчёта.

В **DEFORM** построение сетки реализовано двумя способами: абсолютным и относительным. Первый позволяет задать сетку с заданным количеством конечных элементов, второй – с заданным отношением максимального и минимального конечного элемента в сетке. Ещё одной важной особенностью является возможность автоматического перестроения сетки, позволяющая получать результаты даже при больших изменениях в геометрии детали в процессе расчёта.

В **ANSYS Workbench** и **DEFORM** присутствует возможность сгущения сетки в областях, где проходит пластическая деформация детали. Это позволяет сократить общее время как на построение самой сетки, так и на расчёт. В данных системах при изменении и повторном построении сетки, старые параметры сетки заменяются новыми, в то время как в **LS-DYNA** при создании новой сетки она накладывается на старую, что способствует появлению ошибок при вычислении. Кроме этого **LS-DYNA** имеет возможность анализа процесса механообработки без построения сетки конечных элементов. Для этого используется метод сглаженных частиц (SPH) – данный метод сокращает полное время на вычисление процесса по сравнению со временем, которое тратится в других CAE системах. Метод SPH работает с использованием деления объекта на дискретные элементы, называемые частицами. Эти частицы имеют пространственные размеры – расстояния, на которых их свойства сглаживаются, поэтому любая физическая величина частицы может быть получена путём суммирования соответствующих величин всех частиц, которые находятся в пределах двух сглаженных длин.

Для моделирования процессов резания, оптимальным вариантом является **ANSYS Workbench**, который обладает гибким инструментом построения и изменения конечно-элементной сетки. В случаях, не требующих построения сложной сетки, рациональнее использовать **DEFORM** из-за возможности автоматического перестроения сетки.

Построение сетки в **LS-DYNA** сложнее, чем в других системах. Поэтому лучше использовать метод SPH, который сокращает время расчёта.

Для оптимизации процессов механообработки необходимо использовать автоматическое построение сетки со сгущением в области срезания стружки.

ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ И НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Общие принципы задания граничных условий для различных CAE систем практически идентичны.

Кроме задания движения инструмента и фиксации заготовки необходимо задать место контакта инструмента с заготовкой. В **ANSYS Workbench** для этого достаточно указать поверхности соприкосновения.

Для моделирования контакта между режущим инструментом и заготовкой в **LS-DYNA** рекомендуется использовать два типа контакта: **Automatic nodes to surface** и **Automatic surface to surface**. В параметрах этих контактов задаётся сила трения, коэффициент вязкого демпфирования, температура и другие свойства взаимодействия между объектами.

В системе **DEFORM**, кроме задания контакта, необходимо задать взаимодействие объектов друг с другом. При моделировании механообработки, кроме взаимодействия инструмент и заготовка необходимо создать взаимодействие заготовка-заготовка, т. к. большое значение в данной задаче будет иметь внутреннее трение и деформации в плоскости сдвига в заготовке в процессе резания. В данных взаимодействиях указываются коэффициенты теплопередачи, трения и другие.

Также посредством изменения граничных условий можно имитировать использование СОТС (смазочно-охлаждающие технологические средства). Для этого увеличивается коэффициент теплоотдачи в окружающую среду для всей модели или только для зоны резания.

Для оптимизации процессов механообработки необходимо установить прямые взаимосвязи режимов резания и некоторых технологических условий (места крепления заготовки и инстру-

мента, наличие и тип СОТС, температура окружающей среды) с соответствующими граничными условиями.

ВЫВОД И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В большинстве САЕ систем вывод результатов производится в виде цветового отображения градиентов физических величин. Данный способ удобен для определения значений в некоторых зонах модели.

Для получения данных о физической величине в конкретной точке удобно пользоваться инструментом вывода информации в определённом узле или конечном элементе. Такую информацию можно получить в виде таблиц, в которых расписаны все данные о процессе моделирования, начиная от создания объектов до вывода результатов.

Программные продукты **DEFORM** и **ADVENTEDGE** позволяют также просматривать информацию о действующих силах, крутящих моментах, энергии и других параметров отдельных объектов модели в виде графиков с шагом по времени, перемещению или итерации (рис. 3).

Для моделирования процесса механообработки в качестве результатов достаточно получать только те физические величины, которые определяют эффективность процесса резания. К таким показателям относятся силы резания (при осевой обработке – осевая сила и крутящий момент), температура в зоне резания, остаточные

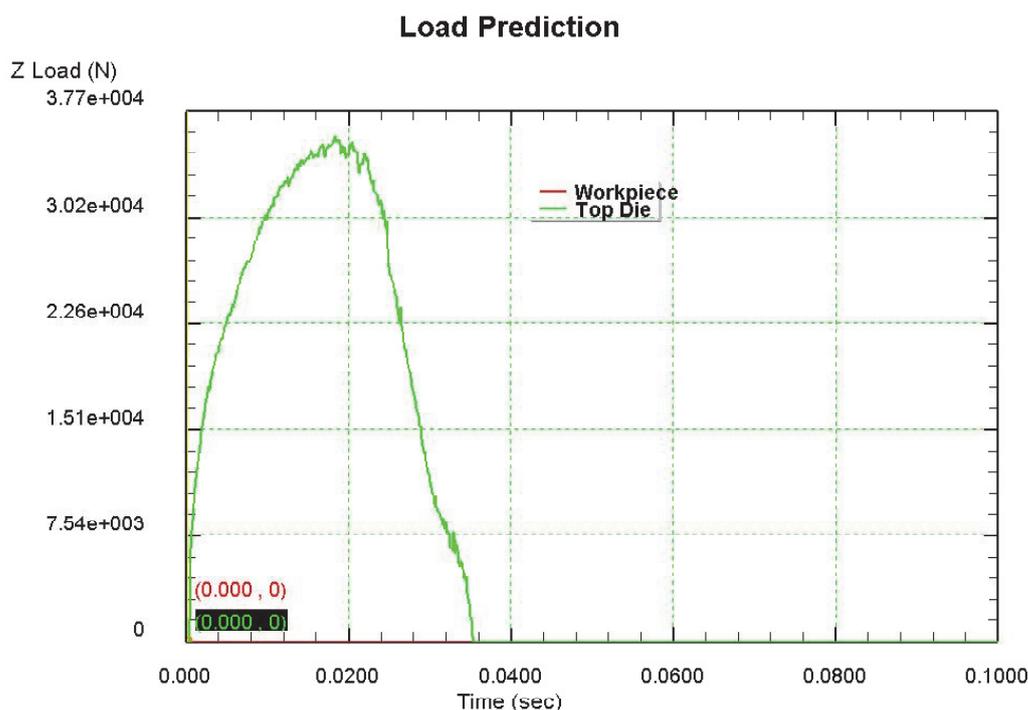


Рис. 3. График зависимости осевой силы инструмента от времени в DEFORM

напряжения в заготовке, количественные характеристики пластической деформации (например, коэффициент усадки стружки).

Для оптимизации процессов механообработки необходимо провести зависимости между величинами, характеризующими эффективность резания (стойкость инструмента, качество и шероховатость поверхности детали), и начальными технологическими условиями.

ВЫВОДЫ

В **таблице 1** приведены результаты сравнительного анализа моделирования процессов ме-

Таблица 1. Таблица сравнительных характеристик CAE систем

	ANSYS Workbench	LS-DYNA	AUTODYN	ABAQUS	DEFORM	ADVENTEDGE
Создание геометрии	++	+++	++	+++	+++	++
Наложение сетки	+++	+	++	++	++	+++
Задание материалов	+++	+	+++	++	+++	++
Граничные условия	+++	+	++	++	+++	+++
Вычисление	+	+++	++	++	++	++
Результаты	++	+++	+	++	++	++
Работа с композиционным материалом	Да (модули ACP)	Да (библиотека типов материалов)	Нет	Да (существует 3 типа элементов)	Нет	Нет

Условные обозначения к таблице 1:

Создание геометрии:

+++ – Доступно эскизное моделирование, экспорт и импорт геометрии, изменение геометрических параметров объектов и положения в пространстве.

++ – Доступно эскизное моделирование, экспорт и импорт геометрии, изменение геометрических параметров объектов, перемещение в пространстве невозможно.

Наложение сетки:

+++ – Гибкая настройка параметров сетки (размер элементов, интенсивность, сгущение, тип элементов и т.д.), автоматическое наложение сетки с оптимизацией под формы и размеры объекта.

++ – Изменение размера элементов сетки, выбор типа элементов, автоматическое наложение сетки с ручной настройкой формы и размеров объекта.

+ – Изменение размеров элементов сетки. Бессеточный метод (SPH).

Задание материалов:

+++ – Библиотека материалов, добавление новых параметров в готовые материалы из библиотеки, создание нового материала и занесение в библиотеку.

++ – Библиотека материалов отсутствует, возможность добавления нового материала.

+ – Библиотека материалов отсутствует, включена библиотека типов материалов с настройкой из свойств. Возможность добавления новых материалов или типов отсутствует.

Задание граничных условий:

+++ – Задание внешних факторов (гравитация, температура окружающей среды и т.д.). Простой интерфейс. Автоматическое наложение связей между объектами.

++ – Установка внешних факторов. Полуавтоматическая наложение связей между объектами с настройкой свойств контакта (сила трения, температура в зоне соприкосновения и другие).

+ – Ручная настройка граничных условий. Выбор типа контакта между объектами, с заполнением нужных для расчёта свойств.

Вычисление:

+++ – Полный контроль параметров расчёта (время всего процесса, шаг расчёта, кинетическая энергия в выбранных узлах и другие).

++ – Автоматический процесс вычисления с указанием шага расчёта. Остановка и продолжение расчёта. Визуальное отображение о ходе вычисления.

+ – Анимация, сохранение видео. Визуальные показания о ходе процесса без графического спектра величин расчета.

ханообработки в САЕ-системах. Общие результаты по этапам моделирования:

- **Создание геометрии:** Отличительная сторона *LS-DYNA*, *ABAQUS* и *DEFORM* заключается в перемещении моделей независимо от выбранной системы координат (не имеют привязки к ней).

- **Наложение сетки:** *ANSYS Workbench* и *ADVENTEDGE* обладают гибкой настройкой параметров сетки. Программный продукт *LS-DYNA* включает бессеточный метод (SPH – метод сглаженных частиц).

- **Задание материалов:** Преимущество программных средств *ANSYS Workbench*, *AUTODYN* и *DEFORM* заключается в широком выборе материала из встроенной библиотеки. В программе *LS-DYNA* присутствует перечень типов материалов.

- **Задание граничных условий:** *ANSYS Workbench*, *DEFORM* и *ADVENTEDGE* обладают способностью наложения граничных условий в автоматическом режиме, изменяя параметры условий под процесс моделирования.

- **Вычисление:** Особенность полного контроля над процессом расчёта имеет программное средство *LS-DYNA*. В программных продуктах *AUTODYN*, *ABAQUS*, *DEFORM* и *ADVENTEDGE* вычисление проходит в автоматическом режиме с визуальным отображением о его ходе.

- **Результаты:** *LS-DYNA* способна в ручном режиме до начала вычисления настраивать параметры вывода результатов. В продуктах *ANSYS Workbench*, *ABAQUS*, *DEFORM* и *ADVENTEDGE* присутствует визуальный вывод результатов.

- **Работа с композиционными параметрами:** В *ANSYS Workbench* для работы с композитами существуют модуль ACP (*Ansys Composite PrePost*). В *LS-DYNA* присутствует библиотека типов материалов, предназначенная для моделирования композитных материалов.

Отдельно рассмотрим выводы по программным продуктам, которые целесообразнее использовать для моделирования механической обработки резанием.

DEFORM в своём составе имеет специальный шаблон для механообработки, позволяющий создавать модель поэтапно в режиме мастера.

Пользователю достаточно выбрать толь-

ко тип операции, задать режимы обработки, инструмент и заготовку. В *DEFORM* нет своего модуля проектирования геометрических моделей, но есть несколько специальных компонентов, позволяющих генерировать твердотельные модели некоторых типов заготовок и инструментов (например, свёрл) на основе их геометрических размеров. После выполнения расчёта можно просмотреть результаты, представленные в виде графических полей и графиков.

ANSYS Workbench обладает достаточно удобным интерфейсом, позволяющим настроить все основные условия и параметры, не углубляясь в детальную настройку. От пользователя требуется лишь указать входные данные (материалы, модели объектов, сгенерированные сетки и т.д.), граничные условия (скорость и направление движения, внешние факторы, места крепления объектов и т.п.) и то, что он хочет увидеть в результате вычисления. *ANSYS* автоматически подберёт все параметры вычислений по полученным от пользователя данным. По окончании вычислений можно вывести результат в графическом формате и текстовый вариант всех входных данных и конечных результатов в виде таблиц.

В *LS-DYNA* для получения подобного результата пользователю придётся настраивать все вручную, начиная от внесения времени перемещения объекта и нагрузки, которая должна быть распределена от начала движения до конца пути, кончая контролем за выходными параметрами. Основной плюс данной системы в том, что пользователь сам контролирует весь процесс механообработки и может влиять на ход вычисления и на вывод результатов.

Выводы основаны на ряде расчётов, выполненных в пакетах программ, результаты которых не приводятся в силу ограниченности объёма статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Криворучко Д.В., Залого В.О., Корбач В.Г.* Основы 3D-моделирования процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2009. 208 с.

FEATURES OF THE SIMULATION OF MACHINING PROCESSES IN CAE-SYSTEMS

© 2013 I.V. Gorbunov, I.V. Efremenkov, V.L. Leontev, A.R. Gismetulin

Ulyanovsk State University

The article compares and evaluates capabilities of engineering software packages for computer simulation of machining processes. It describes the best practices of the implementation and optimization of technological preparation of production with the help of CAE systems.

Keywords: CAE system, DEFORM, ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN, ADVENTEDGE, simulation of machining, composite materials, computer model, optimization, technological preparation of production.

Igor Gorbunov, Post-Graduate Student at the Mathematical Modeling of Technical Systems Department, Junior Researcher at the Scientific Research Center of CALS-technologies.

E-mail: GorbunovIV@ulsu.ru

Ivan Efremenkov, Post-Graduate Student at the Mathematical Modeling of Technical Systems Department, Junior Researcher at the Scientific Research Center of CALS-technologies

E-mail: kikurato@yandex.ru

Victor Leontev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Mathematical Modeling of Technical Systems Department.

E-mail: LeontievVL@ulsu.ru

Albert Gismetulin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Mathematical Modeling of Technical Systems Department. E-mail: GismetulinAR@yandex.ru