

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

И.А. БЕЛЯЕВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОМД

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки 22.03.02 Металлургия, 15.03.01 Машиностроение, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика

САМАРА
Издательство Самарского университета
2019

УДК 621.77(075)

ББК 34.62я7

Б447

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. кафедры ПДЛА Самарского университета
Г.В. Смирнов ;
канд. техн. наук, начальник конструкторско-технологического
отдела по холодной штамповке предприятия «АО «РКЦ
«Прогресс» Ю.Е. Паламарчук

Беляева, Ирина Александровна

Б447 **Математическое моделирование процессов ОМД:** учеб.
пособие / *И.А. Беляева*. — Самара: Изд-во Самарского университета,
2019. – 84 с.

ISBN 978-5-7883-1351-1

В учебном пособии основное внимание уделено вопросам математического моделирования процессов обработки металлов давлением. Для разных технологических задач даны описание различных программных продуктов в зависимости от поставленных задач (моделирование материала, проектирование штампов, технической оснастки) и рекомендации по их использованию.

Пособие знакомит студентов с основами построения расчетных задач и включает пример использования программного продукта LS-DYNA.

Предназначено для студентов, проектирующих процессы ОМД.

Подготовлено на кафедре ОМД.

УДК 621.77(075)

ББК 34.62я7

ISBN 978-5-7883-1351-1

© Самарский университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Основы математического моделирования	6
1.1. Математическое моделирование в проектировании и технологии	6
1.2. Стратегия математического моделирования	7
1.3. Разработка математических моделей	12
1.4. Задачи математического моделирования	16
1.5. Особенности метода математического моделирования	18
1.6. Структуризация математических моделей	21
1.7. Сложность структурированных моделей	22
1.8. Имитационное моделирование	24
1.9. Требования к моделям	25
1.10. Формирование модели	26
1.11. Оценка результатов	27
1.12. Системный подход к моделированию	29
2. Подходы к математическому моделированию процессов ОМД	30
2.1. Основы теории явного метода динамики	32
2.2. Программное обеспечение для математического моделирования процессов ОМД	35
2.3. Описание программы LS-DYNA	39
3. Основы работы в программе LS-DYNA применительно к процессам ОМД	41
3.1. Основные этапы моделирования	41
3.2. Типы элементов Shell и Solid	41
3.3. Модели материалов для процессов ОМД	44
3.4. Задание свойств	48
3.5. Определение контакта	52
3.6. Определение нагрузок и ограничений	54
3.7. Определение дополнительных параметров	56
3.7.1. Определение параметра контроля Hourglass	56
3.8. Создание k-файла	62
3.9. Решение задачи	63

3.10. Постпроцессорная обработка POST	64
4. Пример математического моделирования	66
4.1. Методика математического моделирования	66
Заключение	80
Список использованной литературы	81

ВВЕДЕНИЕ

Процессы обработки металлов давлением (ОМД) находят широкое применение во многих отраслях промышленности: машиностроении, авиастроении, судостроении и др. К процессам обработки металлов давлением относят процессы горячей и холодной штамповки, осадки,ковки, прокатки, вытяжки, обтяжки, гибки и многие другие.

Несмотря на широкое применение методов ОМД сами процессы еще недостаточно изучены, что сдерживает разработку оптимальных технологий, позволяющих оптимизировать технологический процесс изготовления деталей и снизить расходы для их производства.

В первую очередь, это связано со сложностью процессов, происходящих при пластическом течении металла при обработке металлов давлением. Исследованию пластического течения посвящено немало научной литературы, где выводятся расчетные формулы для различных процессов ОМД. К сожалению, теоретические формулы можно вывести только для относительно простых процессов и со значительными допущениями. При применении заготовок более сложной формы и более совершенных методов ОМД такие формулы уже не работают или дают значительную погрешность и не могут применяться при разработке оптимальных технологий. Применяемые в теории ОМД различные приближенные методы сложны в освоении и требуют тщательного подхода при их использовании. Выходом из этой ситуации является применение программ, основанных на методе конечных элементов.

Данное учебное пособие может применяться для подготовки инженеров, магистров, бакалавров по направлениям подготовки 22.03.02 Металлургия, 15.03.01 Машиностроение, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика.

1. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Математическое моделирование в проектировании и технологии

Современная технологическая система – это совокупность взаимосвязанных потоков энергии, материалов и информации, действующая как единое целое, в котором осуществляется определенная последовательность технологических процессов.

Технологическим системам, которым соответствуют отдельные пределы, производства и технологические цеха современных предприятий, свойственны все характерные признаки больших систем:

- определенная целенаправленность или наличие общей цели функционирования всей системы (все технологические аппараты и потоки объединены для выпуска продукции);
- большие размеры как по числу элементов, составляющих систему, так и по числу параметров, характеризующих процесс ее функционирования (большое число аппаратов, связанных технологическими потоками);
- сложность поведения системы, проявляющаяся в большом числе переплетающихся взаимосвязей между ее переменными (изменение режима работы одного аппарата может оказывать влияние на работу производства в целом);
- выполнение системой в процессе ее функционирования некоторой сложной и многофакторной целевой функции.

В современной практике проектирования больших промышленных систем часто используется эмпирический подход. Это объясняется тем, что большую систему принципиально невозможно точно описать и предсказать ее поведение. Единственный метод, позволя-

ющий облегчить проектирование (а часто и эксплуатацию) такой системы, – это моделирование и в первую очередь – математическое. Модель представляет объект, систему или понятие (идею) в некоторой форме, отличной от формы их реального существования. Она служит средством, помогающим в объяснении, понимании или совершенствовании системы. Модель какого-либо объекта может быть или точной копией этого объекта (хотя и выполненной из другого материала и в другом масштабе), или отображать некоторые характерные свойства объекта в абстрактной форме.

Математические модели используют при прогнозировании поведения моделируемых объектов. Например, строить современный реактивный самолет лишь для определения его летных характеристик экономически нецелесообразно, если они могут быть предсказаны средствами моделирования. На математических моделях выполняют контролируемые эксперименты в тех случаях, когда экспериментирование на реальных объектах практически невозможно из-за отсутствия последних или возникающей во время экспериментов опасности (сети энергоснабжения, химические производства).

1.2. Стратегия математического моделирования

При использовании математического моделирования разработчик должен прежде всего определить, как создать (получить, разработать) модель. Математическое описание является отражением физической сущности процесса со свойственными ему особенностями и ограничениями. Эти особенности и ограничения должны учитываться как при формулировании задачи, так и при составлении описания и выборе численного метода моделирования. Существует несколько видов математических описаний, наиболее распространенными являются динамические и статистические.

Динамическое описание (и соответственно модель) строится на основе фундаментальных теоретических законов и закономерностей

стей. Оно составляется из законов термодинамики, химической кинетики, законов сохранения массы, энергии и учитывает такие явления, как диффузия, тепло – и массопередача, гидродинамика перемешивания и т. д.

Статистическое описание основано на обработке экспериментальных данных. Исследуемый объект характеризуется вектором факторов, определяющих целевую функцию или выходные параметры.

При планировании эксперимента собираются данные для определения коэффициентов зависимости между входными и выходными параметрами процесса. Имеется много вариантов установления такой зависимости на основе статистического анализа. Основная трудность (без учета экономической эффективности) заключается в выборе вектора состояния, элементы которого действительно характеризовали бы поведение реального процесса, а также в получении зависимости, допускающей не только интерполирование, но и экстраполирование решения за пределы области определения коэффициентов этой зависимости.

Каждый вариант дает возможность построить модель, адекватную процессу по выбранному критерию. Применяя различные способы, можно получить множество моделей, изоморфных исследуемому объекту. Поэтому при выборе структуры модели, критерия адекватности модели процессу, а также ее параметров необходимо учитывать цель моделирования и задачу, которая ставится при разработке модели. Другой задачей, стоящей перед разработчиком при использовании моделирования в процессе проектирования, является подготовка математической модели. При решении этой задачи модель приводится к какой-либо стандартной структурной схеме дискретного процесса, а система уравнений – к дискретной форме, что позволяет использовать компьютер. Этот этап моделирования завершается математическим описанием технологических процессов и структурной схемой всей моделируемой системы, которая должна быть идентична структурной схеме промышленной системы по потоку информации. Стратегия

принятия инженерных решений с помощью методов математического моделирования заключается в следующем:

1. Определяется область существования рациональных решений, разрабатываются математические модели отдельных процессов и структуры в целом, а также проводятся ориентировочные расчеты, цель которых – оценить связи между структурой и параметрами модели, а также взаимное влияние основных критериев и ограничений. Формируется общая стратегия выбора проектных параметров, определяются основные критерии, по которым необходимо добиваться лучших решений.

Значения параметров определяются перед каждым расчетом характеристик системы; они неизменны в ходе этого расчета, но меняются в процессе оптимизации. Одной из целей поиска решения является просмотр различных сочетаний значений параметров и определение тех из них, которые соответствуют лучшим проектным характеристикам или обеспечивают допустимые значения для других проектных характеристик. Проектными критериями обычно являются стоимостные характеристики или какие-либо другие показатели эффективности. При синтезе структуры летательного аппарата, например, за критерий часто принимаются весовые характеристики. Количественные критерии, значения которых улучшаются при оптимизации, называют целевыми функциями. Одновременно с критериями до моделирования определяются проектные ограничения – характеристики, значения которых не должны быть меньше или превышать задания.

2. Производится поиск лучших проектных решений, для чего формулируется поисковая задача, т.е. выявляются варьируемые проектные параметры, основные ограничения.

В большинстве случаев поисковая задача разбивается на несколько отдельных задач по оптимизации ряда критериев. Определяются цели оптимизации и выбирается численный метод решения задачи дискретного или нелинейного программирования с несколькими переменными и ограничениями. Для поиска оптимальных параметров

системы, а также для синтеза ее оптимальной структуры пригодны различные численные методы, ориентированные на компьютере. После серии оптимизаций, проведенных на модели по нескольким критериям и при различных значениях ограничений, можно перейти к третьему этапу – этапу выбора рациональных решений.

3. По отдельным критериям проводится сравнение лучших решений и для выбора самого рационального из них предъявляются дополнительные количественные и качественные требования. В модели учитываются достоверность проектных оценок и степень риска при использовании новых решений, оптимальных по ряду критериев. Рациональное решение можно определить как решение, близкое по ряду критериев к оптимальным, но отличающееся от них настолько, насколько при его выборе учтены дополнительные формализуемые и неформализуемые показатели. Таким образом, современный инженер-проектант, используя компьютерные технологии для поиска, должен всегда знать точно, где находится оптимум по каждому из учитываемых им критериев, чтобы суметь отступить от этого оптимума в сторону более простых, доступных и надежных конструктивных решений.

Математическое моделирование производственных объектов и процессов

Термин «математическое моделирование» охватывает методологически малосвязанные разработку модели и ее использование. Иногда моделированием называется каждый из этих двух этапов в отдельности.

Изучение свойств объекта моделирования путем анализа аналогичных свойств его модели представляет собой процесс моделирования. В зависимости от характера и сложности тех или иных явлений при их изучении могут быть использованы соответствующие методы моделирования. Выбор методов определяется поставленной задачей. Модель называется изоморфной (одинаковой по форме), если между

нею и реальной системой наблюдается полное поэлементное соответствие. Такое соответствие имеется между негативом и полученным с него изображением, чертежом и изготовленной по нему деталью, между процессами в реальной системе и уравнением, описывающим поведение этой системы. Однако во многих случаях изоморфные модели оказываются сложными и неудобными для практического использования, поэтому более удобны модели, которые позволяют судить только о существенных аспектах поведения реальных систем без их детализации. Пример такой модели – географическая карта по отношению к изображенному на ней участку земной поверхности. Модели, отдельные элементы которых соответствуют лишь крупным частям реальной системы, а полное поэлементное соотношение между моделью и системой отсутствует, называются гомоморфными.

Моделирование производственного процесса состоит в имитации выполнения на элементах производства (оборудовании, участках) операций над продуктами (полуфабрикатами, заготовками, сырьем и т.д.) путем изменения вычисляемых значений соответствующих параметров элементов или продуктов. Значения некоторых параметров могут быть функциями времени. Элементы производства характеризуются, кроме того, состояниями (занят, исправен и т.д.). Передача продукта от одного элемента к другому моделируется передачей информации о его параметрах и изменением состояний элементов. Каждый элемент производства отображается отдельной частью математической модели, т.е. общая модель разбивается на блоки, которые могут совпадать с частной математической моделью одной из подсистем технического объекта или моделью некоторого физического или технико-экономического расчета. Блоки связаны сравнительно небольшим числом передаваемых параметров. Обычно технический объект расчленяется на конечное число блоков, и каждый из них первоначально моделируется независимо от остальных. Частные модели блоков затем связываются на основе фактической иерархии технического объекта. Декомпо-

зиция и связь блоков выполняются как в пространстве, так и во времени и целиком зависят от задачи разработчика.

Мерой качества полученной таким образом модели является в наиболее общем случае отсутствие в ней внутренних противоречий и согласованность полученных результатов с действительностью, часть которой они описывают. При создании основ такой модели необходимо придерживаться следующего принципа: чем меньше количество элементов, с помощью которых можно для решения поставленной задачи описать действительность, тем совершеннее модель.

Математическое моделирование напоминает физический эксперимент. В математической модели, как и в лабораторной установке, представлены составные части системы и окружающая ее среда. В ходе испытаний модели через некоторые интервалы времени выдаются информация о поведении компонентов и показания приборов. При использовании современных технических средств моделирование в компьютерных программах так же наглядно, как и физический опыт (особенно для относительно простых систем). Это позволяет быстро получить сведения о различных вариантах изучаемого процесса. При этом в относительно короткий срок можно найти оптимальные варианты математической модели, т.е. осуществить ее оптимизацию и, следовательно, оптимизировать сам процесс.

Математическое моделирование включает следующие этапы:

- составление математического описания процесса;
- создание алгоритма, моделирующего изучаемый процесс;
- проверка адекватности модели изучаемому процессу;
- использование модели.

1.3. Разработка математических моделей

Составление математического описания состоит в установлении связей между параметрами процесса и выявлении его граничных

и начальных условий, а также в формализации процесса в виде системы математических соотношений, характеризующих изучаемый объект (технологический процесс). Математическое описание составляется на основе материальных и энергетических балансов, а также физических законов, определяющих переходные или какие-либо иные специфические особенности процесса.

Для построения математических моделей технических объектов используются фундаментальные законы физики: сохранения массы, энергии и т. д. Соответственно модели записываются в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, отражающих материальный и тепловой балансы аппаратов, изменения тока и напряжения электрической цепи и т.д.

В систему математического описания в общем случае могут входить: алгебраические уравнения, обыкновенные дифференциальные уравнения и в частных производных, эмпирические формулы, логические условия и др.

При моделировании сложных технологических систем возможны следующие случаи:

1. Моделируемая система достаточно хорошо изучена, что позволяет записать аналитические соотношения, которые и будут служить моделью (законы Кирхгофа, уравнения кинетики, уравнения энергетического и материального балансов и т.п.). Предполагается, что все коэффициенты аналитических соотношений известны.

2. Математическая модель известна с точностью до неизвестных параметров, для вычисления которых проводится необходимое число экспериментов.

3. Известно, что моделью может служить одна из функций. Необходимо провести эксперимент для дискриминации моделей и определить неизвестные параметры адекватной модели.

4. Аналитический вид модели неизвестен вообще.

В трех последних случаях эффективными являются статистические методы моделирования, представляющие собой совокупность методов многомерной статистики и имитационного моделирования.

Методы многомерной статистики (методы регрессионного, дисперсионного, ковариационного, факторного, компонентного и других анализов) базируются на наблюдении за функционированием моделируемой системы и обработке результатов наблюдений. При этом наряду с пассивным наблюдением за системой иногда имеется возможность проводить планирование входных возмущений системы. Тогда эффективно применение методов и идей математической теории планирования эксперимента. Проверку адекватности (соответствия) математической модели исследуемому процессу необходимо проводить по той причине, что любая модель является лишь приближенным отражением реального процесса вследствие допущений, всегда принимаемых при составлении математической модели. На этом этапе устанавливается, насколько принятые допущения правомерны, и тем самым определяется, применима ли полученная модель для исследования процесса. При необходимости математическая модель корректируется. Для этого используются результаты измерений на самом объекте или на его физической модели, воспроизводящей в небольших масштабах основные физические закономерности объекта моделирования. Поскольку метод математического моделирования позволяет расчленять сложные процессы на более простые составляющие, то перечисленные задачи могут решаться несколько раз (на отдельных этапах).

Рассмотренные этапы являются подготовительными, создающими условия для успешного использования математической модели. От качества подготовки модели зависит качество получаемых результатов, которые заранее предсказать трудно. Однако иногда можно заранее определить, что именно математическое моделирование для решения данной задачи наиболее приемлемо. Это возможно в тех случаях, когда сложно поддерживать одни и те же рабочие режимы при каждом повторении эксперимента на работающем оборудовании или в течение всего времени проведения серии экспериментов для получения одной и той же величины выборки (и, следовательно, статистической значимости результатов экспериментирования). При

этом могут потребоваться чрезмерные затраты времени и средств при экспериментировании с реальными системами. Невозможно исследование множества альтернативных вариантов, связанных с аварийными или опасными технологическими режимами; есть уверенность в успешном создании модели изучаемой системы или операции. Для этого следует заранее иметь возможность сбора необходимого количества информации об элементах и связях в моделируемой системе, что обеспечивает достоверность процесса моделирования. Имеется возможность (и необходимость) побочного использования процесса построения моделей элементов системы для их исследования; все другие методы решения непригодны.

Практически математическое моделирование как метод не имеет ограничений, так как: моделирующая система может одновременно содержать описания элементов непрерывного и дискретного действия и быть подверженной влиянию многочисленных случайных факторов сложной природы; допустимо описание системы соотношения большой размерности; обеспечивается простота перехода от одной задачи к другой введением переменных параметров, возмущений и различных начальных условий. Последовательным наращиванием элементов моделей можно исследовать системы любой сложности, для которых достаточно полно известны функционирование и взаимосвязь относительно несложных исходных элементов. При этом переход на более высокий уровень моделирования звеньев системы связан с увеличением количества участвующих в модели элементов, что приводит к необходимости их упрощения или к представлению в виде обобщенных характеристик, полученных на предыдущем этапе имитации. При этом объем моделей сохраняется в некоторых допустимых пределах. По сравнению с физическим метод математического моделирования более универсален, так как он:

- позволяет с помощью одного устройства осуществить решение целого класса задач, имеющих одинаковое математическое описание;

- обеспечивает простоту перехода от одной задачи к другой, введение переменных параметров, возмущений и различных начальных условий;
- дает возможность моделировать по частям (по «элементарным» процессам), что особенно существенно при исследованиях сложных объектов химической технологии;
- использует быстродействующую вычислительную технику, которая непрерывно совершенствуется;
- экономичнее метода физического моделирования как по затратам времени, так и по стоимости.

1.4. Задачи математического моделирования

При использовании математических моделей решается одна из двух задач – определение необходимых параметров технического объекта и выявление желательной его структуры – либо совокупность этих задач. Модели могут применяться как средства осмысливания действительности, общения, обучения и тренажа, средства постановки экспериментов (в том числе оптимальных), а также в качестве инструмента прогнозирования. При использовании модели в качестве средства осмысливания действительности методами математического моделирования можно проводить эксперименты при полностью контролируемом объеме условий моделирования, что исключает возможность воздействия на результаты моделирования случайных факторов. В сочетании с современными вычислительными средствами эти методы позволяют с относительно небольшими материальными затратами исследовать всевозможные варианты аппаратурного оформления технического процесса, изучить его основные свойства в допустимых и аварийных условиях. При этом в рамках используемой модели всегда гарантируется отыскание оптимальных решений, если они требуются.

Как средство общения хорошо продуманная модель не имеет себе равных. Все языки, в основе которых лежит слово, в той или иной мере оказываются неточными в случае сложных понятий и описаний. Правильно построенные модели помогают устранить эти неточности, предоставляя в наше распоряжение более действенные способы общения. Преимущество модели перед словесными описаниями заключается в сжатости и точности представления заданной ситуации. Модель делает более понятной общую структуру исследуемого объекта и вскрывает важные причинно-следственные связи.

Математическую модель можно использовать в качестве средства обучения и тренажа в сфере образования и профессиональной подготовки.

При разработке и использовании модели экспериментатор видит и «разыгрывает» на ней реальные процессы и ситуации. Это помогает ему понять поставленную задачу, что стимулирует процесс самообучения. На этапе проектирования важнейшее значение приобретает использование математических моделей в качестве инструмента для анализа, оптимизации и прогнозирования поведения моделируемых объектов.

Моделирование аварийных ситуаций в работе системы управления позволяет не только освободить конструктора от утомительных проверок схемы, но и расширить число исследуемых вариантов поведения системы, повысить достоверность выводов в отношении ее безаварийной работы. С помощью математического расчета можно анализировать на стадии проектирования как внешние, так и внутренние причины возникновения аварийных ситуаций. Математические модели все шире используются непосредственно в системах управления. Подобные модели необходимы для исследования и совершенствования управления техническими системами и применяются в АСУ как на стадии проектирования, так и эксплуатации. Для решения задач управления моделируются реакции объекта, управляющие воздействия, структура системы управления и кон-

троля и так далее, т. е. имитируются процессы, происходящие в управляющей части системы.

1.5. Особенности метода математического моделирования

Количественный и качественный выигрыши от применения математического моделирования на ЭВМ состоят в следующем:

1. Полностью или частично отпадает необходимость в длительном и трудоемком этапе изготовления лабораторного макета или полупромышленной установки; в затратах на комплектующие изделия, материалы и конструктивные элементы, необходимые для изготовления макетов и установок; в измерительных приборах и оборудовании для испытаний системы.

2. Значительно сокращается время определения характеристик (а следовательно, и доводки объекта) и время испытаний.

3. Появляется возможность разрабатывать системы, содержащие элементы, характеристики которых известны, но самих элементов, разработчика нет в настоящее время; имитировать воздействия, воспроизведение которых при натуральных испытаниях затруднено, требует сложного оборудования, сопряжено с опасностью для установки или экспериментатора, а иногда вообще невозможно; легко получать дополнительные характеристики объекта, которые сложно или невозможно получить с помощью измерительных приборов (характеристики параметрической чувствительности, частотные и пр.).

Метод математического моделирования, как любой численный метод, обладает существенным недостатком: решение всегда носит частный характер, соответствуя фиксированным значениям параметров системы и начальных условий. Поэтому для всестороннего анализа системы приходится многократно моделировать ее процесс функционирования, варьируя исходные данные.

При решении всех задач проектирования с использованием математического моделирования первоочередным вопросом является

получение необходимой точности. Недостаточная точность моделируемых данных может привести к ложным выводам или выбору неправильного варианта технологического процесса (либо параметра, что менее опасно). В случае моделирования на компьютере инструментальную точность ограничивают два существенных фактора: надежность компьютерного расчета (или, точнее, вероятность случайного сбоя в процессе счета) и точность формирования случайных чисел при статистических исследованиях и моделировании. При отсутствии двойного счета ошибки вследствие случайного сбоя компьютерных вычислений входят непосредственно в результаты моделирования и вносят трудноустранимую дополнительную погрешность, которая может быть значительной, особенно при малых вероятностях исследуемых событий. Случайные сбои при решении ряда задач могут быть обнаружены визуальным контролем с помощью графических дисплеев, сопряженных с компьютером, на котором выполняется моделирование.

Представление процессов реальных непрерывных систем при моделировании в виде ряда дискретных чисел (состояний) сопряжено с дополнительной потерей точности. Поэтому представление состояний модели и входных сигналов не может быть выбрано произвольно, а зависит от требуемой точности результатов, характеристик этих сигналов и особенностей моделируемой системы и должно быть специально рассчитано.

Применение математического моделирования

В каждой отдельной отрасли цели, задачи и возможности математического моделирования определяются конкретными условиями. Для химической промышленности, например, определены следующие возможности математического моделирования полного производства:

- предсказание влияния изменений рабочих условий, технологической схемы и производительности;

- быстрый расчет материального и теплового балансов, что необходимо как для проектирования, так и для изучения ежемесячного выпуска продукции на действующем производстве;
- быстрая и надежная оптимизация режима эксплуатации;
- обнаружение и ликвидация узких мест;
- получение обширной информации о поведении всей системы;
- улучшение или создание новой, более совершенной системы автоматического регулирования при разработке системы управления с использованием компьютерных расчетов вне контура регулирования;
- расчет стоимостных показателей управления и планирование.

При анализе электронных схем математическая модель включает зависимости параметров элементов схемы и законов их распределения от условий эксплуатации (температуры, давления и т. д.) в пределах технологического допуска. Наличие такой информации об элементах схемы позволяет имитировать ее испытания на модели. Изменения условий эксплуатации в заданных ТЗ пределах пересчитываются в машине в соответствующие изменения параметров элементов схемы, затем проводятся многократные испытания на модели при различных сочетаниях воздействий, изменений питающих напряжений и отклонений параметров элементов вследствие их технологического разброса. В заключение проводится математическая обработка результатов этих многократных испытаний и делается вывод о качестве (пригодности и пр.) электронной схемы.

Метод математического моделирования играет значительную роль при решении задач, связанных с автоматизацией управления. Результаты моделирования позволяют вскрыть закономерности процесса, определить потоки управляющей информации и обоснованно выбрать алгоритмы управления. Методом статистического моделирования может быть оценена эффективность различных принципов

управления, вариантов построения управляющих систем, а также работоспособность и надежность управляющей аппаратуры. Существенной областью применения метода математического моделирования является также сравнительная оценка различных алгоритмов управления и обработки информации. Моделирование позволяет экспериментально исследовать сложные внутренние взаимодействия в рассматриваемой системе (или в ее подсистеме), определить, какие из переменных системы наиболее существенны и как эти переменные взаимодействуют. Типичным примером такой задачи является задача об оптимальном соотношении между точностью и частотой выдачи информации различными датчиками или управляющими блоками, а также выделение минимального количества информации, которое еще обеспечивает заданное качество управления. Выделив информацию, доступную для управления, можно перейти к рассмотрению возможностей структуры системы управления. Одним из возникающих при этом вопросов является оценка оптимальной централизации (децентрализации) управления.

Таким образом, математическое моделирование позволяет решать (или облегчает решение) сложные задачи практики, и тем эффективнее, чем сложнее эти задачи.

1.6. Структуризация математических моделей

Технологические процессы характеризуются значительной сложностью. Это проявляется в большом количестве информации, содержащейся в промышленных системах, и во взаимном влиянии их параметров. Построение любой математической модели для таких процессов начинают с блочного формализованного описания объекта моделирования, т. е. составлению полного математического описания предшествует анализ отдельных «элементарных» процессов, протекающих в объекте моделирования. Причем математические модели промышленных процессов удобно составлять по фактически суще-

ствующим отдельным установкам и аппаратам, что значительно облегчает проверку их реализации через компьютерные расчеты.

Полная модель процесса получается как комбинация вариантов моделей отдельных блоков.

Такой подход эффективен, но затруднен тем, что развитие промышленности протекает в условиях непрерывного усложнения технологической структуры предприятий, включая объединение отдельных производств в крупные комбинаты и многосвязные сети. Анализ этих производств, включающих огромные количества разнородных элементов при неполной информации об их функционировании, и может быть выполнен классическими методами и требует использования теории и аппарата больших систем. Согласно этой теории решаемые задачи подразделяются на три класса:

- хорошо структурированные или количественно сформулированные задачи, в которых существенные зависимости выяснены настолько точно, что могут быть выражены в числах или символах;
- неструктурированные или качественно выраженные задачи, содержащие лишь описание важнейших ресурсов, признаков и характеристик;
- количественные, зависимости между которыми не известны;
- слабо структурированные или смешанные задачи, содержащие как качественные, так и количественные элементы;
- анализ больших систем предназначен для решения слабо структурированных задач.

1.7. Сложность структурированных моделей

Основная цель разбиения полной системы на элементы, блоки и подсистемы – это построение ограниченного набора соотношений между характеристиками системы. В общем случае для полной слож-

ной системы эта задача оказывается непосильной. Поэтому обычно приходится расчленять систему на большое количество элементов, математическое описание которых может быть выполнено.

Для определенности процесса декомпозиции введем численную меру сложности модели. В основу этой меры положим трудоемкость получения модели, т.е. затраты, необходимые для создания модели. Назовем эту меру сложностью.

Функцию сложности в некоторых случаях можно считать аддитивной, т.е. если модель объекта состоит из нескольких подсистем, то общая сложность равна сумме сложностей этих подсистем, т.е. процесс декомпозиции модели можно рассматривать как процесс минимизации ее сложности. С помощью упрощения некоторых параметров: геометрии, свойств и т.д., получаем математическую модель для расчета.

Математическими моделями называются комплексы математических зависимостей и знаковых логических выражений, отображающих существенные характеристики изучаемого явления. Во многих случаях математические модели наиболее полно отображают объект. Примером являются системы алгебраических и дифференциальных уравнений.

Поскольку последние представляют собой наиболее абстрактные и, следовательно, наиболее общие модели, математические модели широко применяются в системных исследованиях.

Однако каждое применение математической модели должно быть обоснованным и осторожным: символическая модель всегда является абстрактной идеализацией задачи, поэтому при решении последней необходимы некоторые упрощающие предположения, которые могут привести к тому, что модель не будет служить действительным представлением данной задачи.

Математические модели могут быть аналитическими или имитационными.

При использовании аналитических моделей процессы функционирования элементов сложной системы записываются в виде неко-

торых функциональных соотношений (алгебраических, интегродифференциальных, конечно-разностных и т.п.) или логических условий.

Аналитическая модель может исследоваться одним из следующих способов:

- аналитически – когда получают в общем виде явные зависимости для искомым величин;
- численно – когда, не имея решения уравнений в общем виде, применяют средства вычислительной техники, чтобы получить числовые результаты при конкретных начальных данных;
- качественно – когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения, например, оценить устойчивое решение и т. п.

В зависимости от характера решаемой задачи в процессе имитационного моделирования с различной степенью сложности воспроизводятся и промежуточные результаты анализа. Это удобно, т.к. получаем реализацию выходного процесса, по которой в случае необходимости может быть дана выборочная оценка корреляционной функции выходных данных.

1.8. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование напоминает физический эксперимент.

Отсюда первое достоинство имитационных моделей – наглядность результатов моделирования (как окончательных, так и промежуточных).

Если при аналитическом моделировании обеспечивается подобие характеристик объекта и модели, то при имитационном подобии имеется в самих процессах, протекающих в модели и реальном объекте.

Одно из основных достоинств имитационных моделей – возможность моделирования даже в тех случаях, когда аналитические модели либо отсутствуют, либо (из-за сложности системы) не дают практически удобных результатов. Достаточно просто при имитационном моделировании реализуются алгоритмы обработки результатов решений для выработки.

Имитационное моделирование позволяет учесть влияние большого числа случайных и детерминированных факторов, а также сложных зависимостей при вводе в модель соответствующих элементов и операций. С точки зрения сбора статистических данных имитационная модель дает возможность проводить активный эксперимент с помощью целенаправленных изменений параметров модели на некотором множестве реализаций. Последнее позволяет исследовать оптимизируемые функции качества (функционалы) системы с помощью компьютерных расчетов.

К достоинствам имитационного моделирования применительно к промышленным объектам относятся: динамический характер отображения системы; возможность учета случайных факторов и сложных зависимостей от них; сравнительная простота введения модификаций в модель (поскольку ее структура аналогична функциональной и логической структурам системы); возможность исследования системы на множестве модельных реализаций ее функционирования, т. е. проведения статистических экспериментов; практически неограниченные возможности применения различных видов математического анализа.

1.9. Требования к моделям

При моделировании сложной системы обычно используется совокупность нескольких моделей из числа всех разновидностей. Любая система или подсистема может быть представлена различными способами, которые значительно отличаются друг от друга по слож-

ности и детализации. В большинстве случаев в результате исследований появляется несколько различных моделей одной и той же системы. При этом в зависимости от глубины анализа простые модели последовательно заменяют все более сложными.

Для удобства оценки и сравнения схем моделирования между собой сформулируем три главных требования к математическим моделям.

Точность математической модели – ее свойство, отражающее степень совпадения предсказанных с ее помощью значений параметров объекта с истинными значениями этих параметров.

Истинные значения параметров объекта обычно отождествляют с экспериментами полученными. Однако погрешности эксперимента во многих случаях оказываются соизмеримыми с погрешностями математической модели, а иногда и заметно их превышают. При сравнении с экспериментальными данными полученные результаты математического моделирования не должны превышать 15% от полученных данных после проведения экспериментов. В настоящее время разница в погрешности существенно уменьшилась, но 15% берем как границу, за которую нельзя заходить.

Экономичность математической модели определяется прежде всего затратами машинного времени на вычисление той или иной задачи. Показателем экономичности математической модели может служить также количество внутренних параметров, используемых в ней. Чем больше таких параметров, тем больше затраты машинной памяти и тем больше усилий требуется для получения сведений об их численных значениях.

1.10. Формирование модели

Формирование модели представляет собой второй этап моделирования. На этом этапе в соответствии с задачами исследования осуществляется воспроизведение, или имитация, объекта на компьютере

с помощью программы, которая включает в себя закономерности и другие исходные данные, полученные на этапе анализа. Структура модели существенно зависит от задач исследования. Так, например, если проверяется полнота и правильность наших знаний об объекте, последний имитируется с использованием всех известных исходных соотношений. Если же задача заключается в проверке некоторых предположений и степени их общности, то именно эти предположения вводятся в программу и в результате имитации получают объекты, которые лишь частично отражают реальные свойства имитируемого объекта.

1.11. Оценка результатов

Оценка результатов заключается в установлении адекватности модели и объекта исследования – в определении степени близости, сходства, компьютерных расчетов и экспериментальных данных. При этом существенно не «абсолютное качество» численных методов полученных результатов, а степень сходства с объектом исследования.

Успешный результат сравнения (оценки) исследуемого объекта с моделью свидетельствует о достаточной степени изученности объекта, о правильности принципов, положенных в основу моделирования, и о том, что алгоритм, моделирующий объект, не содержит ошибок, т. е. о том, что созданная модель работоспособна. Такая модель может быть использована для дальнейших более глубоких исследований объекта в различных новых условиях, в которых реальный объект еще не изучался.

Чаще, однако, первые результаты моделирования не удовлетворяют предъявленным требованиям. Это означает, что, по крайней мере, в одной из перечисленных выше позиций (изученность объекта, исходные принципы, алгоритм) имеются дефекты. Это требует про-

ведения дополнительных исследований и соответствующего изменения машинной программы, после чего снова повторяются второй и третий этапы. Процедура повторяется до получения надежных результатов.

Этап оценки модели является важным этапом моделирования. В зависимости от характера объекта исследования и поставленных задач применяются различные методы оценки модели. Особенно большое значение имеет правильная оценка модели, когда моделирование используется для проверки гипотез, а также когда объекты недостаточно формализованы и нет строгого объективного критерия сходства объекта и модели. С подобной ситуацией часто приходится встречаться при моделировании интеллектуальных, творческих процессов.

Модель должна обладать существенными признаками объекта моделирования. Иначе говоря, модель и объект должны быть неотличимы по этим признакам, которые выбираются, вообще говоря, исследователем в зависимости от цели и задачи исследования. Так, чучело птицы моделирует внешний вид птицы, но не моделирует ее динамического состояния, например полета. Самолет – орнитоптер (летательный аппарат с машущими крыльями) не моделирует внешнего вида птицы, зато моделирует ее полет.

При моделировании творчества также имитируются лишь отдельные стороны объекта, наиболее интересные (или доступные) для исследователя. Наличие существенных для объекта признаков в модели определяется по-разному, в зависимости от его вида. В одних случаях эти признаки обнаруживаются непосредственно: например, в модели гармонизации – путем отыскания ошибок, в модели шахматиста (шахматной программе) – по результатам игры с настоящими шахматистами. В других случаях существенные признаки оказываются «скрытыми» и для их отыскания приходится прибегать к специальному эксперименту.

1.12. Системный подход к моделированию

Любой искусственный объект можно рассматривать с двух точек зрения: глазами пользователя и глазами разработчика. Покупая телевизор, Вас интересует, прежде всего, его дизайн и технические характеристики, например размер экрана. Вы смотрите на объект как бы с внешней стороны – глазами пользователя. Телевизор в данном случае – это в буквальном смысле черный ящик и содержимое его для Вас не представляет никакого интереса.

Другое дело – разработчик. Чтобы спроектировать тот же телевизор, надо решить, из каких деталей он будет изготовлен и как их собрать воедино, чтобы всё работало. Таким образом, разработчика интересует внутреннее строение объекта – его структура.

Рассмотрим примеры математического моделирования процессов обработки металлов давлением (ОМД). Данное учебное пособие покажет принцип создания математических моделей на различных примерах воздействия в том или ином смысле на заготовку.

За расчетную программу примем LS-DYNA. Рассмотрим ее функциональные возможности.

2. ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ОМД

Математическое моделирование является эффективным средством анализа и понимания различных объектов нашего мира. Большой вклад в развитие методов математического моделирования процессов обработки металлов давлением внесли отечественные и зарубежные ученые – В. Джонсон, Э. Томсен, Р. Хилл, А.И. Целиков, П.И. Полухин, И.Я. Тарновский, Г.Я. Гун, А.А. Поздеев, В.П. Полухин, А.П. Чекмарев, В.П. Северденко, Г.А. Смирнов-Аляев, В.С. Смирнов, И.Л. Перлин, А.Д. Томленов, Б.В. Кучеряев и др. Анализу современных подходов к моделированию процессов обработки металлов давлением посвящены работы Г.Я. Гуна, А.П. Грудева, Б.В. Кучеряева, С.Е. Рокотяна, А.В. Выдрина и многих других [1].

Начало 80-х годов XX века можно считать временем первого внедрения компьютерного моделирования процессов ОМД в промышленность. Тогда несколько машиностроительных компаний США начали использовать программный пакет ALPID (Analysis of Large Plastic Incremental Deformation), разработанный Баттельским мемориальным институтом при содействии ВВС США. Этот программный продукт имел множество технических проблем, например, таких как малая функциональность препроцессора и большие временные затраты на моделирование штамповки поковок даже простой формы. В частности, моделирование процесса штамповки диска турбины простейшей формы занимало несколько дней. Кроме того, в этот период пользователю приходилось несколько раз останавливать моделирование, чтобы внести некоторые необходимые поправки в исходные данные. Пакет ALPID позволял решать лишь двумерные задачи (2D), а именно – моделировать течение металла при штампов-

ке осесимметричных деталей. Трёхмерное моделирование в то время казалось невозможным вследствие соответствующего уровня развития вычислительной техники, сложностей с генерацией сетки конечных элементов и т.п. Несмотря на все эти проблемы, ALPID показал весьма достойные результаты, позволяющие предприятиям-пользователям значительно экономить средства, необходимые для проведения экспериментальных исследований при разработке новых технологических процессов.

Шаг за шагом моделирование процессов ОМД стало важным элементом разработки технологического процесса. Сегодня более 80% крупных (250 и более сотрудников), более 75% средних (100-249 сотрудников) и более 50% мелких (50-99 сотрудников) машиностроительных компаний США используют моделирование процессов ОМД при разработке технологических процессов [2]. Развитие методов математического моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением в сочетании с широким внедрением персональных компьютеров позволяет создавать уникальные программы, позволяющие в автоматизированном режиме моделировать процессы пластического формоизменения, исследовать напряжённо-деформированное состояние, температурные поля при обработке металлов давлением. Исследования, проводимые в программах конечно-элементного моделирования, позволяют подобрать оптимальный технологический процесс при обработке металлов давлением, оптимальные, рациональные марки материала в зависимости от напряженно-деформированного состояния конструкции, необходимые материалы и форму для максимальной эффективности удара при разрушении и др. Результаты моделирования позволяют выявить напряженно-деформированное состояние как самой конструкции, так и формирующего элемента в любой точке модели и любой промежуток времени; критические, опасные зоны и участки модели, в которых возможно возникновение разрушения или деформации конструкции; силовые,

энергетические, деформационные, контактные величины при взаимодействии частей модели и многое другое.

Внедрение компьютерного моделирования в производство сопровождалось серьезными изменениями в подходе к разработке технологических процессов. Двадцать пять лет назад очень немногие технологи пользовались такими понятиями, как напряжение текучести, интенсивность деформаций, интенсивность скоростей деформаций. При моделировании процессов ОМД эти показатели весьма существенны. На данный момент вузы и промышленные предприятия осознали важность моделирования процессов ОМД при разработке технологических процессов и в связи с этим уделяют данному вопросу все больше внимания. Моделирование процессов ОМД в вузах часто выделяется в отдельную дисциплину. Во-первых, это позволяет студентам лучше освоить теорию обработки металлов давлением – не только по рисункам и диаграммам из справочников, но и на основе расчетов и анализа результатов. Во-вторых, проведение лабораторных работ помогает студентам лучше понять специфику каждого технологического процесса обработки металлов, изучить его особенности и проблемы. В-третьих, работа на компьютере для современных студентов намного привлекательнее работы в читальном зале библиотеки.

2.1. Основы теории явного метода динамики

Явными (Explicit) методами называют методы решения уравнений динамики, не связанные с решением систем уравнений, но использующие рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предшествующих шагах. В случае использования диагональной матрицы масс (вместо стандартной – согласованной разряженной) удастся ее обратить, упростив тем самым расчет и многократно уменьшив

время одной итерации (посредством замены триангуляции матриц с решениями при переменных уравновешивающих нагрузках на матричные умножения). Такая методика предполагает малые шаги и достаточно мелкую разбивку, чтобы правильно описать диагональной матрице распределения масс. В качестве компенсации малый шаг позволяет отследить все изменения в характеристиках конструкции и в ее поведении.

Все нелинейности (включая контакт) учитываются в векторе внутренних сил. Основное время занимает не формирование и обращение матриц, а вычисление этого вектора. Из-за очень малого размера шага (на практике $10^{-7} - 10^{-6}$) явные методы обычно применяются только для расчета кратковременных процессов. В программном продукте LS-DYNA при явном интегрировании применяется метод центральных разностей, когда ускорение полагается постоянным в течение шага. Для трех последовательных моментов времени принимается квадратичная аппроксимация вектора перемещений [4]. При использовании явного метода решения применяется *метод центральных разностей* [5] – это ускорение, оцененное за время t :

$$a_t = [M]^{-1}((F_t^{ext}) - (F_t^{int})),$$

где a_t – вектор ускорения;
 F_t^{ext} – приложение внешней силы;
 F_t^{int} – внутренние силы.

$$F_t^{int} = \sum(\int_{\Omega} B^T \cdot \sigma_n \cdot d \cdot \Omega \cdot F^{hg}) + F^{cont},$$

где F^{hg} – сила сопротивления искажению hourglass («паразитная» форма деформации, которая может вызвать аварийную остановку расчетной задачи);

F^{cont} – контактная сила.

Исходя из полученных значений ускорений (a_t) вычисляются скорости и перемещения:

$$\{V_{t+\Delta t/2}\} = \{V_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t;$$

$$\{U_{t+\Delta t/2}\} = \{U_t\} + \{V_{t-\Delta t/2}\} \Delta t_{t+\Delta t/2},$$

где $t_{t+\Delta t/2} = 0,5 (\Delta t + \Delta t_{t+\Delta t})$;

$$\Delta t_{t-\Delta t/2} = 0,5 (\Delta t - \Delta t_{t+\Delta t}).$$

Геометрия обновляется добавлением приращения перемещения и исходной геометрии:

$$\{x_0\}: \{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}.$$

Некоторые замечания:

- для упрощения обращения матриц требуется диагональная матрица масс;
- уравнения становятся разьединенными и могут быть решены явно;
- не требуется обращение матрицы жесткости, все нелинейности (включая контакт) включены в вектор внутренних сил;
- не требуется проверка сходимости, т.к. уравнения несвязанны;
- для устойчивости решения требуются очень малые временные шаги. Решение будет устойчиво, только если временной шаг (такт) меньше критического:

$$\Delta t \leq \Delta t^{crit} = 2/\omega_{max},$$

где ω_{max} – максимальная собственная круговая частота. Поскольку этот шаг очень мал, то явный метод применяется только для очень быстрых процессов.

Критический шаг для участка длиной L будет равен:

$$\Delta t^{crit} = L/c,$$

где c – скорость прохождения звука для используемого материала.

Для увеличения стабильности процесса используют по умолчанию масштабный коэффициент 0,9:

$$\Delta t^{crit} = 0,9 L / c.$$

Для конечных элементов величина L зависит от длины конечного элемента:

$$L = A / \max (L_1, L_2, L_3, L_4)/$$

Для оболочных элементов:

$$L = 2A / \max (L_1, L_2, L_3, L_4)/$$

2.2 Программное обеспечение для математического моделирования процессов ОМД

Рассмотрим аналоги программного обеспечения для математического моделирования процессов ОМД, их краткое описание. Это такие пакеты как MSC Nastran, Marc, Dytran, PAM-STAMP 2G, QForm 3D, ANSYS [6] (табл. 1).

LS-DYNA – многоцелевая программа, использующая явную постановку метода конечных элементов (explicit finite element program) – предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют инженерам успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формования (процессов ОМД). Рассмотренные программы можно разделить на универсальные и специализированные. Универсальные позволяют решать более широкий круг задач, более гибки к нестандартным и сложным задачам. Однако такие программы сложны в обучении, требуют наличия специальных знаний в области исследуемых задач и основ конечно-элементного моделирования (табл. 1).

Все рассмотренные в таблице программные продукты подходят для исследовательских и научных организаций, для глубокого анализа исследуемых процессов.

Таблица 1. Программы конечно-элементного моделирования и их краткое описание

Назначение	Применяется в ОМД	Универсальная/ специализированная
1	2	3
<p style="text-align: center;">MSC Nastran</p> <p>Обеспечивает полный набор расчетов, включая расчет напряженно-деформированного состояния, запасов прочности, собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, исследование установившихся и не установившихся динамических процессов, решение задач теплопередачи, акустических явлений, нелинейных статических и нелинейных переходных процессов, анализ сложного контактного взаимодействия, расчет критических частот и вибраций роторных машин, анализ частотных характеристик при воздействии случайных нагрузок и импульсного широкополосного воздействия, исследование аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях.</p>	4	Универсальная
<p style="text-align: center;">Marc</p> <p>Представляет собой универсальную конечно-элементную программу для проведения углубленного анализа высоконелинейного поведения конструкций и решения задач теплопередачи. Она широко используется для компьютерного моделирования технологических процессов прокатки, прессования, листового и объемного формования, производства шин, суперпластического формования и т.д.</p>	5	Универсальная

<p style="text-align: center;">Dytran</p> <p>Система анализа высоконелинейных быстротекущих процессов, связанных с взаимодействием конструкции и жидкости (газа) или конструкции и конструкции. Программа позволяет решать широкий спектр задач, связанных с быстротекущими процессами (моделирование столкновения конструкций, разрушения лопатки и т.д.). Dytran применяется в автомобильной, аэрокосмической, оборонной, обрабатывающей и многих других отраслях промышленности.</p>	4	Специализированная
<p style="text-align: center;">РАМ-STAMP2G</p> <p>Специализированное, интегрированное и масштабируемое решение для листовой штамповки. Оно моделирует весь процесс изготовления оснастки от проектирования рабочей поверхности штампа до анализа формообразующих характеристик с проверкой правильности решения, включая анализ и компенсацию пружинения. РАМ-STAMP 2G – специально-ориентированное средство разработки и анализа для проектных организаций, КБ и предприятий автомобильной и аэрокосмической промышленности.</p>	5	Специализированная
<p style="text-align: center;">QForm 3D</p> <p>Основана на методе конечных элементов (ядро системы), предназначена для проектирования оснастки, штампового инструмента, моделирования штамповки,ковки и других процессов ОМД, оптимизации технологических процессов. Конечно-элементные алгоритмы специальным образом адаптированы для расчета процессов формоизменения.</p>	5	Специализированная
<p style="text-align: center;">DEFORM</p> <p>Специализированный инженерный программный комплекс, предназначенный для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки, позволяет моделировать</p>	5	Специализированная

практически все процессы, применяемые в обработке металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.), а также операции термической обработки (закалка, старение, отпуск и др.) и механообработки (фрезерование, сверление и др.).		
<p style="text-align: center;">LS-DYNA</p> <p>Универсальная программная система конечно-элементного анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет. Является довольно популярной у специалистов в области компьютерного инжиниринга.</p> <p>(CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.</p>	5	Универсальная

* – Оценка по 5-балльной системе

Специализированные программы направлены на определенный класс задач, просты в обучении и не требуют глубокого знания процесса и отдельных дополнительных знаний, отличных от исследуемого процесса. Однако такие программы не обладают достаточной гибкостью и позволяют решать лишь определенный узкий класс задач. Специализированные программы подходят для технологических отделов производственных организаций, занимающихся конкретным классом задач. Для исследования процессов ОМД и разработки данных методических материалов использовалась программа LS-DYNA, позволяющая исследовать практически любой из процессов обработки давлением.

2.3. Описание программы LS-DYNA

Для подготовки задачи на расчет с использованием расчетного модуля LS-DYNA нужно воспользоваться любым удобным препроцессором. Это может быть и ANSYS, и HyperMesh. Все зависит от удобства использованной программы для инженера. В препроцессоре создается конечно-элементная модель. Далее, используя LS-DYNA, получаем решение по выбранной схеме интегрирования и просматриваем результаты с помощью стандартных постпроцессоров.

В LS-DYNA поддерживаются неявные (implicit) методы интегрирования динамики, использующие схему Ньюмарка. Расчет сводится к серии решений квазистатических задач с нагрузками, зависящими от времени. Временной шаг может быть не очень малым, поскольку при каждом шаге выполняется решение системы уравнений и проводятся уравнивающие итерации, связанные с матричными операциями. При линейной матрице жесткости интегрирование является, безусловно, устойчивым. Для высокоскоростных процессов (протекающих обычно несколько миллисекунд) и при очень больших деформациях приходится делать шаги весьма малыми, чтобы отследить изменение нагрузки и поведение конструкции. Инерционные нагрузки велики и определяются ускорениями конструкции. Для более точного их расчета эффективно будет вводить ускорения (и скорости) в число узловых степеней свободы и вычислять их напрямую, а не дважды, дифференцируя перемещения. В случае вынужденных постоянных пересчетов матриц формирование полной матрицы и ее многократное решение при переменных нагружениях неэффективны. Критерии сходимости, установленные по умолчанию, настроены на достаточно длительные задачи, поэтому их подбор на практике весьма трудоемок (а порой невозможен). Таким образом, при малом шаге решения задач (например, удара) могут потребовать больше (в десятки / сотни раз) расчетного времени, чем при использовании явных методов, либо не сойтись.

Расчетный модуль LS-DYNA имеет возможность использовать явную постановку решения задачи и позволяет успешно решать кратковременные и быстротекущие задачи, такие как удары, столкновения, и задачи обработки металлов давлением, высокоскоростное воздействие импульсного магнитного поля и т.д.

Особенности программы LS-DYNA применительно к ОМД:

- модели анизотропной пластичности (Hill, Barlat);
- абсолютно жесткий инструмент;
- семь специальных типов контакта, включая термический контакт;
- автоматическая ориентация сегментов;
- связанный термомеханический анализ;
- анализ пружинения;
- произвольные лагранжево-эйлеровые сетки;
- исключение разрушившихся элементов.

3. ОСНОВЫ РАБОТЫ В ПРОГРАММЕ LS-DYNA ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ ОМД

3.1. Основные этапы моделирования

Выполнение процесса моделирования состоит из трех основных этапов:

- препроцессорная подготовка;
- решение задачи;
- постпроцессорная обработка.

Препроцессорная подготовка включает в себя создание геометрической и конечно-элементной модели процесса, определение типов элемента, моделей материала, контактных параметров процесса, введение ограничений и нагрузок, действующих на модель, определение времени расчета и всех других необходимых параметров для выполнения расчета.

Решение задачи позволяет запустить и контролировать процесс решения.

Постпроцессорная обработка позволяет в графическом виде получить результаты выполненного расчета путем построения графиков и эпюр исследуемых процессов, создания анимации процесса и прочее.

3.2. Типы элементов Shell и Solid

При создании расчетных задач используют различные типы элементов. Для определения типов элемента в графическом интерфейсе надо изначально начать использовать тот или иной элемент

(например, HyperMesh) либо *Preprocessor* → *Element Type* → *Add/Edit/Delete* (например, ANSYS). Необходимые типы элемента выбираются из библиотеки типов элемента.

При решении трехмерных задач ОМД в большинстве случаев используются типы элемента *Solid* и *Shell* [5].

Тип элемента *Solid* представляет собой 8-узловой объемный элемент, позволяет использовать 2 подхода к интегрированию конечного элемента: пониженное интегрирование, когда используется одна точка интегрирования, и полное интегрирование.

Пониженное интегрирование позволяет уменьшить время расчета, такой элемент устойчив к воздействию больших деформаций, но в то же время требует включения контроля искажения типа песочных часов *Hourglass*. Полное интегрирование не требует контроля искажения, но увеличивает время расчета.

Тип элемента *Shell* представляет собой 3- или 4-узловой трехмерный оболочный элемент с возможностями определения мембранных свойств. Элемент дает возможность выбрать один из 12 элементных формулировок.

Опции типа элемента SHELL

Элементная формулировка Hughes-Liu использует пониженное интегрирование с некоторым контролем искажения hourglass.

Элементная формулировка Belytschko-Tsay самая быстрая из всех формулировок (применяется по умолчанию). Использует пониженное интегрирование элемента с контролем искажения hourglass. Не должна использоваться, когда элементы испытывают большие деформации.

Элементная формулировка BCIZ Triangular Shell основана на теории пластин *Kirchhoff*, включает пониженное интегрирование элемента.

Элементная формулировка C^0 Triangular Shell (4) основана на теории пластин Mindlin-Reissner, применяет пониженное интегрирование. Формулировка довольно жесткая.

Элементная формулировка Belytschko-Tsay membrane_аналог Belytschko-Tsay, но без жесткости при изгибе. Использует пониженное интегрирование. Эффективна для большинства мембранных приложений. Применяется, где образование складок нежелательно.

Элементная формулировка S/R Hughes-Liu аналог HughesLiu, но применяет выборочное пониженное интегрирование, время расчета увеличено в 3-4 раза, формулировка позволяет избегать некоторого искривления формы элемента.

Элементная формулировка S/R corotational Hughes-Liu близка к формулировке S/R Hughes-Liu, имеет полное интегрирование. Рекомендуется, если в задаче будут наблюдаться искажения формы.

Элементная формулировка Belytschko-Leviathan подобна Belytschko – Wong – Chiang, имеет пониженное интегрирование элемента, но содержит контроль искажений.

Элементная формулировка Fully-integrated Belytschko-Tsay membrane полностью интегрированная мембранная элементная формулировка. Не имеет искажения формы, но медленная при расчете и более жесткая при деформировании.

Элементная формулировка Belytschko-Wong-Chiang_содержит пониженное интегрирование, аналог Belytschko-Tsay, но лишена недостатков при деформировании конструкции.

Элементная формулировка Fast (corotational) Hughes-Liu аналог Hughes-Liu, использует пониженное интегрирование и *corotational* систему.

Элементная формулировка Fully-integrated Belytschko-Tsay полностью интегрированная формулировка, не нуждается в контроле искажения формы.

SHRF – поправочный коэффициент для поперечных касательных напряжений, по умолчанию рекомендуется значение 5 или 6.

NIP – количество точек интеграции по толщине элемента. По умолчанию устанавливается значение 2.

В процессах ОМД в зависимости от величины предполагаемой деформации рекомендуется назначение 3, 5 или 7 точек интеграции по толщине. T1-T4 – толщина оболочки в каждом из четырех узлов.

3.3. Модели материалов для процессов ОМД

LS-DYNA включает большой ряд моделей материала. Чаще всего используют MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

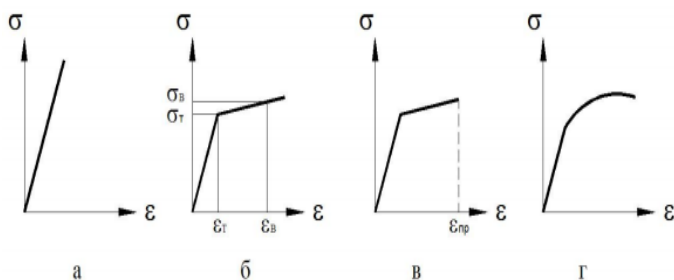


Рис. 1. Графики моделей материала:

а – изотропная упругая модель; б – билинейная изотропная (кинематическая) модель; в – пластическая кинематическая модель с коэффициентом разрушения; г – пластическая модель в степенном виде

В данной постановке может быть определено разрушение, базирующееся на пластических деформациях или минимальном временном шаге.

На рис 2. показано диалоговое окно для подстановки значений характеристик материала.

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY							
ID	[Rho]	[E]	[NU]	[SIGY]	[ETAN]	[EPPF]	[TDEL]
1	2.700e-06	70.000	0.300	0.300		0.100	
[C]	[P]	[LCSS]	[LCSP]	[VP]			

Рис. 2. Вкладка для характеристик материала

MID Mat_ID – номер материала;

RO – плотность (массовая);

E – модуль упругости;

PR – коэф. Пуассона;

SIGY – критическое напряжение (Yield Stress);

SHRF – поправочный коэффициент для поперечных касательных напряжений, по умолчанию, рекомендуется значение 5 или 6;

ETAN – тангенциальный модуль, игнорируется, если определено $LCSS > 0$;

FAIL – флаг разрушения;

< 0 . Для определения разрушения вызывается определенная пользователем подпрограмма;

$= 0$. Разрушения не обрабатываются. Рекомендуемая опция в случаях, когда разрушение не интересно, поскольку это весьма затратно;

> 0 . Для определения разрушения используются пластические деформации. Когда пластические деформации превышают указанное здесь значение, данный элемент удаляется из дальнейшего расчета;

TDEL – минимальный размер временного шага для автоматического удаления элементов;

LCSS – ID кривой (*LS_DYNA* load curve) или таблицы.

Кривая определяет эффективные напряжения в зависимости от эффективных пластических деформаций. Если определены *EPS1-EPS8* и *ES1-ES8* – игнорируется.

Таблица для каждого Strain Rate (коэф. деформации) определяет ID кривой, задающей зависимость напряжений от эффективных пластических деформаций для этого коэффициента

Кривая напряжений от эффективных пластических деформаций для низшего значения Strain Rate используется, если Strain Rate опускается ниже минимально определенного значения.

Аналогично кривая, соответствующая высшему значению Strain Rate, используется в случаях, когда Strain Rate превышает макси-

мально определенное значение. Т.е. экстраполяции данных за пределы определенного в таблице Strain Rate интервала не происходит.

LCSR – ID кривой, определяющей эффект Strain Rate Scaling (масштабирования Strain Rate) в напряжениях текучести (yield stress);

VR – формулировка для rate-эффектов;

=0,0. Масштабировать напряжения текучести (Scale yield stress) (Default);

=1,0. Вязкопластичная формулировка.

Внимание! Если не задать необходимые для данного типа задачи данные, например значение модуля Юнга и/или коэффициента Пуассона (линейно-упругий), границу текучести «*Unitial Yield Stress*» (пластичный материал), плотность материала (задачи нестационарной теплопроводности и динамические), то это вызовет фатальную ошибку при попытке решить соответствующую задачу.

В табл. 2 показаны основные характеристики применяемых материалов для железа, меди, различного вида сплавов.

Таблица 2. Основные характеристики изотропного материала

№	Название (на панели)	Содержание	Ед. изм., система SI	Характерные значения*
Секция <i>Stiffness</i> (упругость)				
1	Young Modulus, E	Модуль Юнга	Pa=N/m ²	(0,7-2,5)*10 ¹¹
2	Shear Modulus, G	Модуль сдвига		G= E/[2(1+nu)]
3	Poissons Ratio, nu	Коэффициент Пуассона	-	0,23-0,42
Секция <i>Thermal</i> (тепловые)				
4	Expansion Coeff, a	Коэффициент линейного температурного удлинения	L ⁰	(0,5-2,5)*10 ⁻⁵

5	Conductivity, k	Коэффициент теплопроводности	W/(m* ⁰ K)	85-400
6	Specific Heat, C _p	Удельная теплоемкость	J/(kg* ⁰ K)	(0,38-0,88)*10 ³
7	Heat generation factor	Коэффициент генерации тепла	-	-
<i>Секция Limit Stress (предельные напряжения, границы текучести)</i>				
8	Tension	При растяжении	Pa	(60-1800)*10 ⁶
9	Compression	При сжатии	Pa	(120-1800)*10 ⁶
10	Shear	При сдвиге	Pa	(40-700)*10 ⁶
<i>Другие</i>				
11	Mass Density, ρ	Плотность материала	kg/m ³	(2,7-9)*10 ³
12	Damping, 2C/C ₀	Коэффициент конструкционного демпфирования G	-	(1-10)*10 ⁻³
13	Reference Temp	Температура испытания	⁰ K (⁰ C+273.15)	>0

* – Железо, алюминий, медь и сплавы на их основе, стали, чугуны

Для работы в программе LS-DYNA необходимо корректно задавать все используемые единицы измерений. Размерность каждой единицы должна быть соответственной и согласовываться с общими правилами [8, 9]:

- [усилие] = [масса]*[ускорение];

- [ускорение] = [длина]/[время²].

Примеры некоторых из согласованных единиц измерений приведены в табл. 3.

Система единиц измерений №1 соответствует системе СИ. В ряде случаев использовать ее не совсем удобно, например, при небольших размерах модели и при моделировании кратковременных процессов.

Таблица 3. **Примеры согласованных единиц измерений**

№	Масса	Длина	Время	Усилие	Напряж.	Плотн.	Мод. Юнга	Уск. св. пад.
1	кг	м	с	Н	Па	7,83e+3	2,1e11	9,8
2	г	см	мкс	1e+7	Мбар	7,83	2,1	9,8e-10
3	тонна	мм	с	Н	МПа	7,83e-9	2,1e5	9,8e3

Система единиц измерений №2 обычно применяется в процессах, длящихся очень малое время (мкс и мс), например в процессах взрыва (при использовании полной LS-DYNA)

Система единиц измерений №3 наиболее удобна в процессах ОМД, поэтому все вводимые далее параметры будут соответствовать этой системе измерений.

3.4. Задание свойств

Свойства «Properties» – это объект (список) с выбранным конкретным типом КЭ и с назначенными его характеристиками, в частности:

ID (номер) материала, его размеры, сечения. Свойство можно создать непосредственно при построении конечно-элементной сетки объекта.

В таблице 4 в алфавитном порядке сведены параметры КЭ (возможно, не все), значения которых нужно вводить в диалоговые окна собственноручно.

Таблица 4. **Основные параметры конечных элементов**

Параметр	Пояснение	Типы КЭ
Allowable Tensile Stress	Допустимое напряжение растяжения	Rod (для ANSYS)
Angle	Угол	Laminate
Area, A	Площадь поперечного сечения	Rod, Bar, Gap

Продолжение табл. 4

Area Moment of Inertia	Момент инерции плоскости	Rod (для ANSYS)
Bend Radius, r	Радиус кривизны	Curved Tube
Bend Stiffness, BS	Присоединенная изгибная жесткость ¹	Bending only, Plate
Bending	Сгиб	Plate
BondShr Allow	Допустимый относительный сдвиг слоев	Laminate
Bottom Surface	Смещение нижней поверхности	Laminate
Coef. for Torsional Stress, C	Коэффициент напряжений при кручении ²	Rod
Compression Stiffness	Жесткость при сжатии	Gap
Damping	Коэффициент вязкого демпфирования	Spring, DOF Spring
Effectiveness Factor, F	Коэффициент приведенной площади сечения дополнительных ребер жесткости ³	Shear Panel
Failure Theory	Теория(критерий) разрушения	Laminate
Fiber (Top, Bottom)	Слой (вершины, основы)	Bending only, Plate, Plain Strain
Friction Coefficient	Коэффициенты трения вдоль осей Y и Z	Gap
H	Высота	Bar, Beam, Curved Beam
Initial Gap	Начальный зазор	Gap
Initial Tension (Cable Only)	Сила начального натяжения(гибкая нить)	Rod
Initial Slack	Начальное послабление	Rod (для ANSYS)
Inner Diameter, Di	Внутренний диаметр	Tube, Curved Tube
Max Penetration	Максимальное проникновение	Gap
Max Adjustment Ratio	Максимальный коэф. настраивания	Gap

Продолжение табл. 4

Min Penetration Ration	Минимальный коэф. проникновения	Gap
Inner Diameter, Di	Внутренний диаметр	Tube, Curved Tube
Max Penetration	Максимальное проникновение	Gap
Max Adjustment Ratio	Максимальный коэф. настраивания	Gap
Min Penetration Ration	Минимальный коэф. проникновения	Gap
Memb-Beud Coupling	Мембранно-сгибающее подкрепление	Plate
Nonsliding Frictional Stiffness	Коэффициент жесткости для относительного смещения	Slide Line
Nonstructural mass/area, N.S.Mass/Area	Неконструкционная масса на единицу площади	почти все двумерные
Nonstructural mass/length	Неконструкционная масса на ед. длины	почти все двумерные
Outer Diameter, Do	Наружный диаметр	Tube, Curved Tube
Penetration	Проникновение	Slide Line
Perimeter	Периметр	Rod, Bar, Beam, Curved Beam
Preload Force	Предыдущая нагрузка	Gap
Radius	Радиус	Bar, Beam, Curved Beam
RefTemp	Начальная температура	Laminate
Shde Line Plane (Coord Sys XY)	Координатная система для КЭ	Slide Line
Static Frictional Coefficient	Статический коэффициент трения	Slide Line
Stiffness	Жесткость ⁴	Spring, DOF Spring
Stiffness Scale Factor	Коэффициент установления допустимого натяжения ⁵	Slide Line

Tension Stiffness	Жесткость при растягивании	Gap
Thick (Top, Bottom)	Толщина (вершины, основы)	Bar, Beam, Curved Beam
Thickness	Толщина	Bar, Beam, Curved Beam, Shear, Axisymmetric Shell
Thickness, Tavg or TI	Среднее значение толщины	Membrane, Bending only, Plain Strain
Torsion Constant, J	Полярный момент инерции сечения	Rod
Transverse Shear	Поперечный сдвиг	Plate
Transverse Stiffness	Поперечная жесткость при закрытом зазоре	Gap
TShear/ Mem Thickness	Изгибная присоединенная жесткость ⁶	Plate
Width	Ширина	Bar, Beam, Curved Beam, Gap
Width (Master, Slave)	Ширина основной и подчиненной контактирующих поверхностей	Slide Line
Width Bottom	Ширина основы	Bar, Beam, Curved Beam

¹ $BS=12I/T^3$, где T-толщина КЭ; $I=I_p/t_p$; I_p – момент инерции сечения одного ребра жесткости; t_p – шаг ребер;

² $C=J/W_k$, где W_k –момент сопротивления сечения при кручении;

³ при $F \leq 1,01$ площадь сечений равна $0,5 Ft_b$, а при $F > 1,01$ она равна $0,5 Ft^2$, где t- толщина КЭ, b-средняя величина ширины КЭ;

⁴ $C_N = \Delta x/N$ или $C_T = \Delta \varphi / T$, где Δx , $\Delta \varphi$ –изменения длины и угла кручения пружины; N,T – продольная сила и момент кручения соответственно;

⁵ коэффициент установления допускаемого натяжения ($0 \leq k_f \leq 1$), регулирует величину штрафа на взаимное проникновение.

Если $k_f = 0$ (по умолчанию), то допускается взаимное проникновение (натяжение) контактирующих поверхностей на величину около 1-2% от перемещений узлов этих поверхностей в направлении нормали к ним. При увеличении k_f допустимое натяжение уменьшается.

⁶ $TS = t_s / t$, где t_s – толщина ребра изгибной присоединенной жесткости, t – средняя толщина конечного элемента.

3.5. Определение контакта

Вводить значение контакта необходимо для исключения взаимного проникновения геометрических объектов сквозь друг друга. Для описания взаимодействия между частями со сложной геометрией в LS-DYNA включены несколько контактных типов:

1. *Single Surface* (тип контакта – единственная поверхность). Контакт определяется, когда поверхность одного тела входит во взаимодействие с собой или с поверхностью другого тела. Преимущество данного контакта в том, что не требуется указания контактных тел. Применяется для самоконтактных задач или задач с большими деформациями, где области контакта заранее неизвестны.

2. *Nodes to Surface* (тип контакта – узлы-поверхность). Контакт определяется, когда в контактный узел проникает главная (target) поверхность. Контакт применяется для контакта между двумя поверхностями. Особенно эффективно, когда меньшая поверхность приходит в контакт с большей поверхностью.

3. *Surface to surface* (тип контакта – поверхность – поверхность). Контакт определяется, когда поверхность одного тела проникает в поверхность другого. Контакт применяется для произвольно расположенных тел, которые могут иметь большие области контакта и эффективны для тел, которые подвержены большому относительному скольжению относительно друг друга.

Каждый из приведенных выше типов контакта включает в себя опции контакта:

1. *General contact* – быстрый и надежный контакт, использующий простые контактные алгоритмы, но требует контроля контактной ориентации поверхностей. Для твердых элементов ориентация поверхностей устанавливается автоматически.

2. *Automatic contact* имеет наиболее общие контактные алгоритмы. В отличие от *General contact* контакт проверяется по обеим сторонам элементов оболочки. Контакт ограничен глубиной контакта, которую при необходимости можно изменить.

3. *Eroding contact* устанавливается, когда поверхностные элементы в процессе контроля могут разрушаться, после этого контакт передается во внутренние элементы. Контакт используется с твердыми элементами, в задачах проникновения и приложений, где имеется разрушение поверхности.

4. *Rigid contact* – используется в случае, когда все тела твердые.

5. *Tied contact* позволяет связать узлы контактных поверхностей. Поверхности должны быть параллельны. В результате главная (*tanget*) поверхность подчиняет контактные узлы другой поверхности и поверхности деформируются совместно.

6. *Tiebreak contact* аналогичен предыдущему за исключением того, что контактные узлы привязаны к главной поверхности, пока не достигнут критерия разрушения. Требуется определение значения критерия разрушения.

7. *Forming contact* основан на автоматических контактных типах и используется в процессах обработки металлов давлением. Инструмент задается как главная (*tanget*) поверхность, заготовка как подчиненная поверхность. При определении контактных параметров также требуется ввести ряд значений:

Static Friction Coefficient – статический коэффициент трения;

Dynamic Friction Coefficient – динамический коэффициент трения;

Exponential Decay Coefficient – коэффициент экспоненциального затухания;

Viscous Friction Coefficient – коэффициент вязкого трения.

Позволяет ограничить силу трения, которая не может превышать значения

$$\sigma_T / \sqrt{3},$$

где σ_T – предел текучести для использованного материала.

Viscous Damping Coefficient – коэффициент демпфирования, который устанавливается в процентах от критического. Как правило, для процессов обработки металлов давлением его значение принимают равным 20%. После определения всех параметров в панели определения контактных параметров для большинства контактных типов требуется определение контактного и главного (целевой, *target*) компонентов.

В процессах ОМД контактным компонентом (Contact Component) является заготовка, а целевым компонентом (Target Component) является инструмент.

3.6. Определение нагрузок и ограничений

В программе LS-DYNA все вводимые значения должны задаваться с привязкой к значениям времени. В процессах ОМД нагрузка, как правило, прикладывается на недеформируемый (*rigid*) инструмент в виде силы или скорости. По возможности параметр, определяющий нагрузку, должен соответствовать реальному процессу. Рекомендуется задавать следующий график нагрузки (рис. 3)

Обозначения на графике:

V_{\max} – максимальная скорость,

t_1 – время разгона,

t_2 – время завершения.

Рекомендуемые значения:

$$V_{\max} = 2-5 \text{ м/с},$$

$$t_1 = 0,001-0,005 \text{ с}.$$

В случае, когда на инструмент прикладывается скорость, начинать моделирование нужно с нулевого значения, как показано на графике (рис.3). При этом максимальная скорость движения инструмента должна быть ограничена значениями 2-5 м/с [7, 13] (рекомендуется величина 2 м/с).

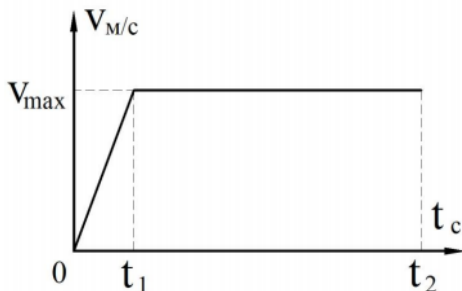


Рис. 3. График нагрузки и рекомендуемые значения для процессов ОМД

В случае, когда на инструмент прикладывается параметр отличный от скорости (например, перемещение, усилие и т.п.), нужно контролировать скорость движения инструмента в процессе расчета, ее значение не должно превышать параметра 2-5 м/с.

В большинстве случаев в процессах ОМД нагрузка прикладывается к твердым телам (которые задает инструмент).

Основные виды нагрузок для твердых тел приведены в табл. 5.

Пример: для задания скорости движения пуансона (представленного как твердое тело) вдоль оси Z мы должны использовать метку RBVZ. Номер части (Part Number) соответствует номеру, присвоенному ранее инструменту в меню Part. Имя параметра (parameter name) соответствует именам, заданным ранее в массиве.

Ограничения применяют для фиксации узлов или элементов модели как в поступательном движении, так и при вращении.

Таблица 5. Основные виды нагрузок для твердых тел и их обозначения

Вид нагрузки	Обозначение метки по осям
Сила	RBFX, RBFY, RBFZ
Моменты	RBMX, RBMY, RBMZ
Перемещения	RBUX, RBUY, RBUZ
Поворот	RBRX, RBRY, RBRZ
Скорости	RBVX, RBVY, RBVZ
Угловые скорости	RBOX, RBOY, RBOZ

Такие ограничения действуют лишь на деформируемые тела. Ограничения на недеформируемые (твердые) тела задаются при определении свойств материала (табл. 2). Используя пункты меню Translation Constrain Parameter (ограничение перемещения) и Rotational Constrain Parameter (ограничение вращения), можно задать соответствующие ограничения.

3.7. Определение дополнительных параметров

3.7.1. Определение параметра контроля Hourglass

Параметр контроля искажения *Hourglass* применяется для элементов с пониженным интегрированием. Назначение параметра – подавлять искажения формы элементов.

Оболочные конечные элементы, используемые в различных программах конечно-элементных расчетов, могут быть классифицированы следующим образом:

FI – элементы с полным интегрированием. Имеют 4 точки интегрирования Гаусса в плане. В каждой точке анализируются все компоненты деформаций.

SRI – элементы с выборочно сокращенным интегрированием. Имеют 4 точки интегрирования Гаусса в плане для мембранных и из-

гибных деформаций и одну точку интегрирования в центре для сдвиговых деформаций из плоскости элемента.

ANS – деформации в мнимых собственных координатах. Имеют 4 точки интегрирования Гаусса в плане для всех компонентов деформации, плюс используется специальная интерполяция для сдвиговых деформаций из плоскости элемента.

RI – Reduced Integration, элементы с сокращенным интегрированием. Имеют одну точку интегрирования Гаусса в плане для всех компонентов деформации.

В строгом смысле слова, полностью интегрируемых конечных элементов в LS-DYNA нет. Применительно к подверженности hourglass эффекту, рекомендуемые к использованию при анализе удар оболочные элементы (см. п.***) можно разделить на две группы:

- Reduced Integration (типы 2 и 10),
- Элемент типа ANS (16).

Считается, что элемент типа 16 не подвержен hourglass эффекту либо подвержен ему в значительной степени меньше, чем элементы с сокращенным интегрированием. Поэтому проблема hourglass эффекта рассматривается как проблема Reduced Integration элементов.

Считается, что если в расчете используются элементы с неполным интегрированием, то паразитные hourglass формы деформаций элемента в той или иной степени появляются всегда.

Рассмотрим мембранную X-составляющую деформации в плоскости прямоугольного 4-узлового оболочного элемента (рис. 4).

X – составляющие скоростей узлов элемента содержат всю необходимую информацию для определения X – приращения деформации в нем.

Вектор X – составляющую скорости узлов элемента можно разложить на 4 физически реальных базисных вектора (поступательное движение твердого тела, растяжение-сжатие, простой сдвиг и изгиб в плоскости):

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{Bmatrix} = \dot{x}_{rb} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \dot{x}_{ts} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \dot{x}_{ss} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix} + \dot{x}_{hx} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

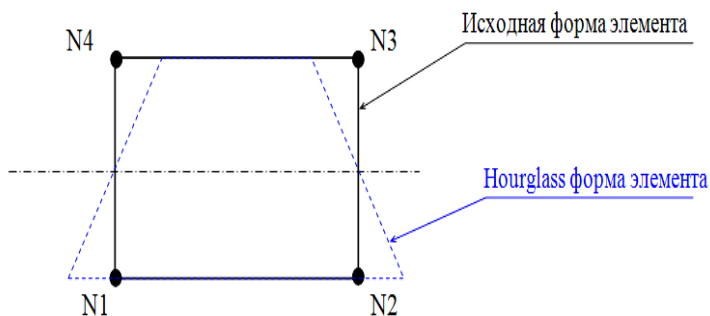


Рис. 4. Hourglass форма элемента

Последний базисный вектор (изгиб в плоскости) рассматривается как соответствующий вредной паразитной деформации. Проявление такой деформации называют hourglass эффектом в силу схожести двух соседних деформированных по этому типу элементов с песочными часами.

Элементы с неполным интегрированием демонстрируют 5 hourglass форм.

Помимо рассмотренной X-мембранной присутствуют Y-мембранная; hourglass форма коробления (рис. 5,а), а также X и Y вращательные hourglass формы (рис. 5,б). Последние особенны тем, что не отображаются средствами визуализации картины деформаций.

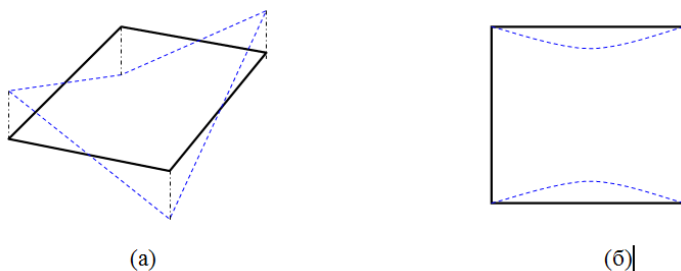


Рис. 5. Виды hourglass форм

Треугольные оболочные элементы, очевидно, не подвержены hourglass эффекту. Однако использование треугольников как штатного средства моделирования исключено в силу того, что они значительно завышают жесткость модели в расчете.

Проблемы, связанные с hourglass эффектом, вызваны тем, что в элементе, имеющем одну точку интегрирования, значение деформации, вычисленное в этой точке для hourglass формы, будет равно нулю.

Следовательно, ничто в формулировке элемента не противодействует нарастанию hourglass эффекта. Скорости hourglass деформирования могут стать бесконечно большими и вызвать расхождение решения, аварийную его остановку.

Как отмечалось, предотвратить hourglass эффект у RI элементов не представляется возможным. Этот эффект естествен для таких элементов. С другой стороны, с нарастающим hourglass эффектом невозможен расчет.

Эти обстоятельства вызвали необходимость введения в расчет алгоритмов искусственного сопротивления распространению hourglass деформаций

Предположим, что в расчете у элемента появилась ненулевая составляющая hourglass деформации (последнее слагаемое выражения). В этих условиях логично применить к элементу поле узловых сил, направленных навстречу этим деформациям (рис.б), силы $F_1 - F_4$.

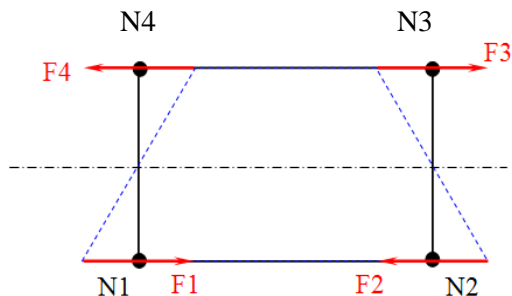


Рис. 6. Элемент с узловыми силами

В LS-DYNA реализованы два алгоритма генерации таких компенсирующих сил.

Первый – вязкий способ *hourglass* контроля.

Величины генерируемых сил пропорциональны скорости нарастания *hourglass* деформации:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} = -h_m a \dot{\epsilon}_{hx} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Параметр a в выражении (2) имеет размерность вязкости и не определяется пользователем. Пользователь имеет возможность управлять значением безразмерного коэффициента h_m . Таким образом, получаем вектор сил, направленных навстречу *hourglass* деформациям, пропорциональных скорости *hourglass* деформирования и масштабированных коэффициентом h_m .

В терминах LS-DYNA этот коэффициент называется *hourglass* коэффициентом.

Hourglass коэффициент определяется в командах *CONTROL_HOURGLASS (поле QH) и/или *HOURLASS (поле QM).

Команда *CONTROL_HOURGLASS применяется ко всей модели в расчете.

Команда *HOURGLASS определяет параметры борьбы с hourglass эффектом в рамках конкретной PART модели.

Рекомендуется использовать default значение hourglass коэффициента (0,1) во всех LS-DYNA расчетах.

Второй – способ борьбы с hourglass деформациями по жесткости.

Величины генерируемых сил определяются жесткостью элемента и hourglass деформациями:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} = -h_m \int \frac{Et}{8} \dot{x}_{hx} dt \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Подынтегральное выражение в формуле определяет перемещения в результате hourglass эффекта.

Принципиальная разница в двух этих подходах заключается в следующем:

В пределе, при использовании подхода на основе вязкости, при возникновении hourglass деформаций их скорости уменьшаются до нуля и hourglass эффект не распространяется.

При использовании подхода на основе жесткости мы как бы имеем дело с пружинами, в пределе возвращающими элемент в исходное (недеформированное) состояние.

Какой подход лучше?

Применительно к оболочечным элементам оба эти подхода неплохи и успешно компенсируют hourglass эффект в случае, если силы F1 – F4 невелики.

У объемных элементов использование подхода на основе жесткости обычно завышает жесткость. Поэтому такой подход для солюдов использовать не рекомендуется.

Какой именно подход применяется в расчете, определяется в полях INQ команд *CONTROL_HOURGLASS и/или *HOURGLASS.

Оболочные элементы:

INQ = 0 = 1 (стандартная LS-DYNA вязкая форма) = 2 = 3 – вязкий hourglass контроль;

INQ = 4 = 5 – stiffness hourglass контроль.

INQ = 8 – hourglass контроль, используемый для элементов типа 16.

Солидные элементы:

INQ = 0 = 1 – вязкая форма, не рекомендуется,

= 4 = 5 – stiffness hourglass контроль, не рекомендуется,

= 2 = 3 – рекомендуемая вязкая форма,

= 6 – stiffness форма, новая разработка, лучше вязкой в случаях не очень высокоскоростного деформирования солида.

***Таким образом, при выполнении расчетов ОМД
рекомендуется использовать параметры команд hourglass
контроля в их default значениях***

Силы, соответствующие hourglass деформациям, будут уменьшать кинетическую энергию системы в ударе. Поэтому для получения корректных результатов необходимо, чтобы hourglass энергия была значительно ниже энергии обычной деформации (до 10%).

Поскольку средства борьбы с проявлением hourglass эффекта, по большому счету, ограничены default определениями команд *CONTROL_HOURGLASS и *HOURGLASS, то в случае превышения в расчете допустимых значений hourglass энергии необходимо предпринимать меры по корректировке расчетной модели.

Эти корректировки в основном сводятся к трем рекомендациям:

- использовать более качественную и более подробную конечно-элементную сетку в зонах повышенного hourglass эффекта;
- избегать приложения концентрированной нагрузки и закреплений узлов модели;

- использовать формулировку элементов №16 в зонах, где иными средствами не удастся свести влияние hourglass эффекта к приемлемым значениям.

3.8. Создание k-файла

Для запуска расчета в решателе LS-DYNA необходимо создание k-файла, представляющего собой текстовый файл со всей информацией по модели.

3.9. Решение задачи

При запуске задачи на расчет процесс перейдет к решателю программы LS-Dyna и появится окошко процесса решения (рис. 7).

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
initial kinetic energy = 0.0000000E+00

The LS-DYNA time step size should not exceed 9.804E-07
to avoid contact instabilities. If the step size is
bigger then scale the penalty of the offending surface.

Memory required to begin solution      : 442432
Additional dynamically allocated memory: 119906
Total:                                  562338

initialization completed

dt of cycle      1 is controlled by solid      element      1690

time..... 0.00000E+00
time step..... 9.10930E-08
kinetic energy..... 0.00000E+00
internal energy..... 1.00000E-20
spring and damper energy..... 1.00000E-20
hourglass energy..... 0.00000E+00
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
eroded hourglass energy..... 0.00000E+00
total energy..... 1.00000E-20
total energy / initial energy..... 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy..... 1.00000E+00
global x velocity..... 0.00000E+00
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00
1 t 0.00000E+00 dt 9.11E-08 flush i/o buffers
1 t 0.00000E+00 dt 9.11E-08 write ANSYS result file
cpu time per zone cycle..... 0 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 43084 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 24256 nanoseconds

estimated total cpu time      = 49910 sec < 13 hrs 51 mins>
estimated cpu time to complete = 49998 sec < 13 hrs 51 mins>
estimated total clock time    = 28103 sec < 7 hrs 48 mins>
estimated clock time to complete = 28092 sec < 7 hrs 48 mins>
5000 t 4.5537E-04 dt 9.11E-08 flush i/o buffers
5489 t 4.9992E-04 dt 9.11E-08 write ANSYS result file
10000 t 9.1004E-04 dt 9.11E-08 flush i/o buffers
10978 t 9.9993E-04 dt 9.11E-08 write ANSYS result file

```

Рис. 7. Окошко выполнения процесса решения в решателе программы LS-Dyna

В этом окошке отображается вся необходимая информация, такая как:

- версия решателя;
- минимальный шаг по времени;
- требуемая величина оперативной памяти;
- энергетические параметры процесса;
- временные параметры процесса (текущий временной шаг).

Программа имеет специальные ключи для контроля и завершения процесса решения (для вызова которых нужно нажать сочетание клавиш Ctrl + C):

Sw1 – завершить процесс решения на текущем шаге (с сохранением всей информации);

Sw2 – вывести на экран оставшееся и полное время процесса и продолжить выполнение данного процесса;

Sw3 – формирование файла;

Sw4 – формирование d3plot принудительно.

3.10. Постпроцессорная обработка POST

Постпроцессорная обработка, следующая за стадиями препроцессорной подготовки и получения решения, позволяет обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом, используя набор команд и возможности интерфейса.

Результаты решения (применительно к задачам инженерной механики) включают значения перемещений, напряжений, деформаций, энергии и др.

Результатом работы программы может быть как графическое, так и табличное представление результатов. Графическое изображение можно вывести на монитор, преобразовать в файлы с различными расширениями (форматы BMP, JPEG и др.).

Программа позволяет создать AVI-файлы, что позволяет наблюдать анимацию процесса.

На стадии получения решения результаты записываются в базу данных выбранной пост-программы и в так называемый файл результатов. Результаты, полученные на каждом дополнительном шаге решения, накапливаются как наборы данных [14].

Существуют две возможности обратиться к записанным результатам для последующей постпроцессорной обработки.

Для ознакомления с определенным набором полученных данных, которые относятся ко всей модели или ее части, можно использовать постпроцессор общего назначения. Или можно использовать постпроцессор истории нагружения для выделения из массивов результатов нужных параметров, например узловых перемещений или напряжений в элементе. При считывании данных из файла они сохраняются в базе данных программы, что на стадии постпроцессорной обработки дает возможность иметь доступ ко всем входным параметрам модели (геометрии, свойствам материалов, нагрузкам и т.д.).

Кроме того, средства графического отображения информации включают векторное представление, профили результатов вдоль заданной кривой. При векторном представлении используются отрезки со стрелками, чтобы показать как абсолютное значение, так и направление векторной величины, например вектора перемещения. Профиль результатов представляет собой график, который показывает изменение полученных величин в зависимости от заданного пользователем пути.

4. ПРИМЕР МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На начальном этапе исследований возможно применение различных программных комплексов, позволяющих получить представление о напряженно-деформированном состоянии и технологических особенностях исследуемого процесса.

В данном примере будет применяться расчетный программный комплекс ANSYS/LS-DYNA для автоматизации проектирования процессов листовой штамповки в промышленности, что позволит сократить сроки проектирования, снизить затраты на производство, экономить металл и энергоресурсы.

При математическом моделировании процессов обработки металлов давлением реальную схему процесса заменяют упрощенной схемой, не нарушая при этом адекватность и точность модели.

4.1. Методика математического моделирования

Решение задач с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA состоит из трех этапов: препроцессорная (предварительная) подготовка (Preprocessing), получение решения (Solving the Equations) и постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing). Приведем краткое содержание основных шагов при выполнении каждого из этапов.

На стадии препроцессорной подготовки выполняется выбор типа расчета, построение модели и приложение нагрузок (включая и граничные условия). Здесь задаются необходимые для решения ис-

ходные данные. Пользователь выбирает координатные системы и типы конечных элементов, определяет модель поведения деформируемого материала, указывает упругие постоянные и физико-механические свойства материала, строит твердотельную модель и сетку конечных элементов, выполняет необходимые действия с узлами и элементами сетки, задает уравнения связи и ограничения.

Для моделирования процесса вытяжки была задана геометрия заготовки и инструмента (пуансона, матрицы и прижима).

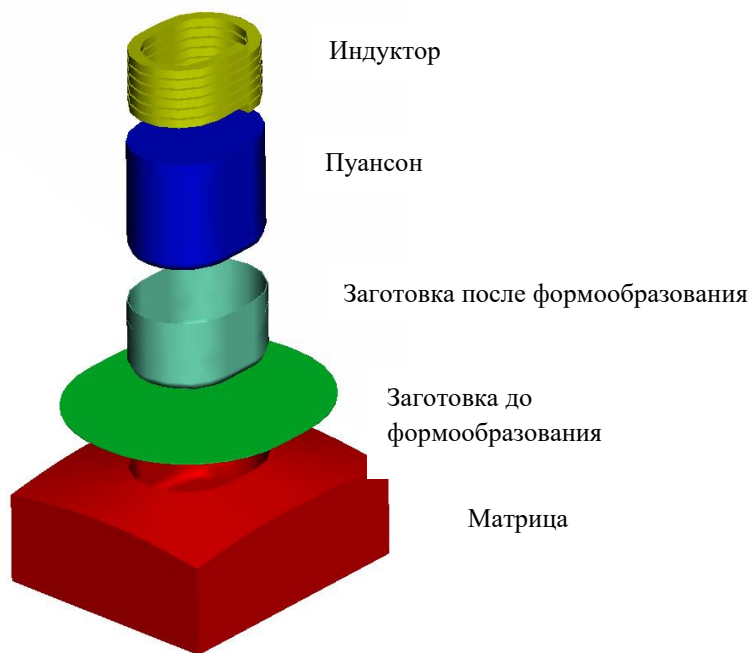


Рис. 8. Взаимное расположение заготовки, индуктора и инструмента

С целью сокращения количества задаваемых элементов и уменьшения времени расчета при моделировании осесимметричной вытяжки достаточно использовать одну четвертую часть оснастки и заготовки. На рис. 9 представлены схема моделируемых поверхно-

стей и ориентация геометрии относительно декартовой системы координат.

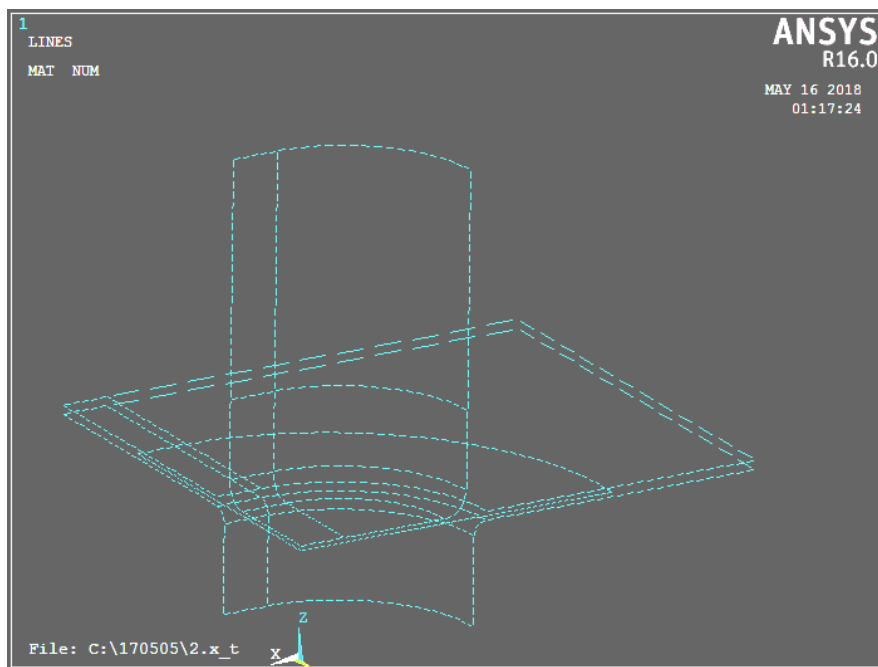


Рис. 9. Эскиз моделируемых поверхностей

Для моделирования процесса используется тип элемента – Thin Shell 163. Это оболочковый элемент с 12 степенями свободы. Данный тип элемента используется как для моделирования заготовки, так и для моделирования поверхности оснастки.

Необходимо задать константы для выбранного типа элемента заготовки и оснастки. Задаем константы для заготовки (рис. 10).

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Real Constants → Element Types for Real Constants → Thin Shell 163.

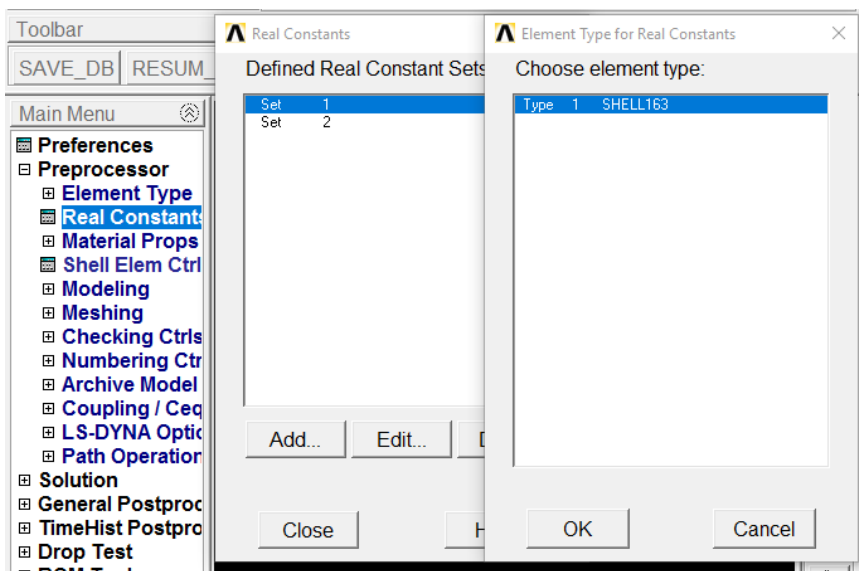


Рис. 10. Задание констант для выбранного типа элемента

В появившемся окне задаем значения констант для материала и оснастки. После чего переходим к выбору модели материала и заданию свойств материалов заготовки и оснастки (рис. 11).

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models

Окна «Define Material Models Behavior» → Меню «Material Models Available» → LS-DYNA → Nonlinear → Inelastic → Kinematic Hardening → Bilinear Kinematic.

В появившемся окне Bilinear Kinematic Material Properties for Material Number 1 задать свойства сплава АМгб (табл. 6).

Таблица 6. Свойства алюминиевого сплава АМгб

DENS (плотность – кг/м ³)	EХ (модуль упругости – Па)	NUXY (коэффициент Пуассона)	Yield Stress (предел текучести - Па)	Tangent Modulus (Тангенциальный модуль - Па)
2640	71e9	0,34	150e6	709e6

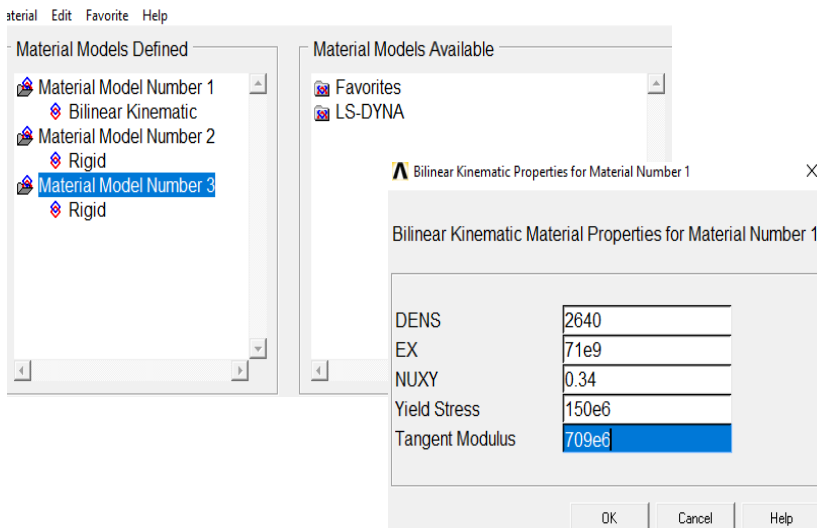


Рис. 11. Задание моделей материала

После задания аналогичным образом свойств пуансона, матрицы и прижима переходим к созданию сетки конечных элементов.

Создавать сетку конечных элементов для заготовки и оснастки будем в следующей последовательности:

- 1) разбить линии созданных поверхностей на сегменты;
- 2) выбрать атрибуты для сетки (в данном случае тип элемента, номер материала и номер констант типа элемента);
- 3) построить сетку.

Для построения сетки разобьем линии построенных поверхностей на определенное количество сегментов. Линии заготовки – на 3 сегмента. Через ANSYS Main Menu запустить окно «MeshTool».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Meshing → MeshTool → Element Size on Picked Lines → в строке NDIV No. of element divisions ввести количество сегментов – 3.

После чего повторяем те же действия для построения сегментов оснастки.

Разбитые на сегменты поверхности подготовлены для создания сетки конечных элементов (рис. 11). Дискретизация исследуемой пространственной области в методе конечных элементов (МКЭ) осуществляется разделением на большое количество малых, но конечных по размерам элементов простой формы. Соседние конечные элементы (КЭ) взаимодействуют между собой только в определенном количестве точек. Эти точки называются узлами КЭ. Все граничные условия и внешние нагрузки также прикладываются к узлам.

Общие требования к КЭМ заготовки

Заготовку следует моделировать объемными элементами, определенными как *ELEMENT_SOLID, при этом:

1) в целях стабильного расчета в модели заготовки недопустимо наличие элементов типа «penta» и «tetra», т.е. следует использовать восьмиузловые элементы типа «hexa». Использование элементов другой формы, особенно в зонах высоких деформаций, может привести к аварийной остановке задачи;

2) модель заготовки должна иметь не менее трех слоев элементов по толщине (рис. 12)

3) для возможности учета «strain-rate» эффекта следует использовать модель материала заготовки *MAT_PIECEWISE-LINEAR-PLASTICITY. Эластопластичный материал с произвольной Strain rate зависимостью.

КЭМ заготовки представлена на рис. 13. Так же такой малый размер был связан с возникающими пластическими деформациями, увеличивающими длину ребра на 200%.

Так как в модели отсутствует адаптивное перестроение сетки, то после первого шага вдоль режущей кромки должны были быть по-

лучены элементы с минимально возможными деформациями. Это необходимо для получения более достоверного результата обрезки.

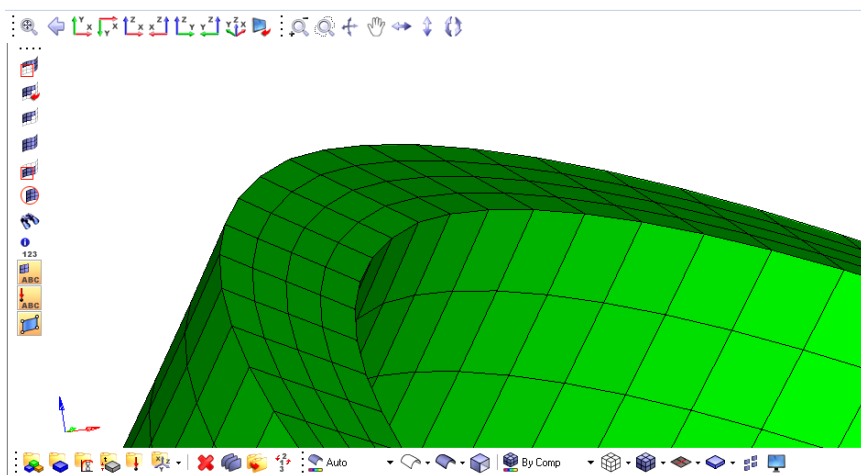


Рис. 12. Толщина исходной заготовки

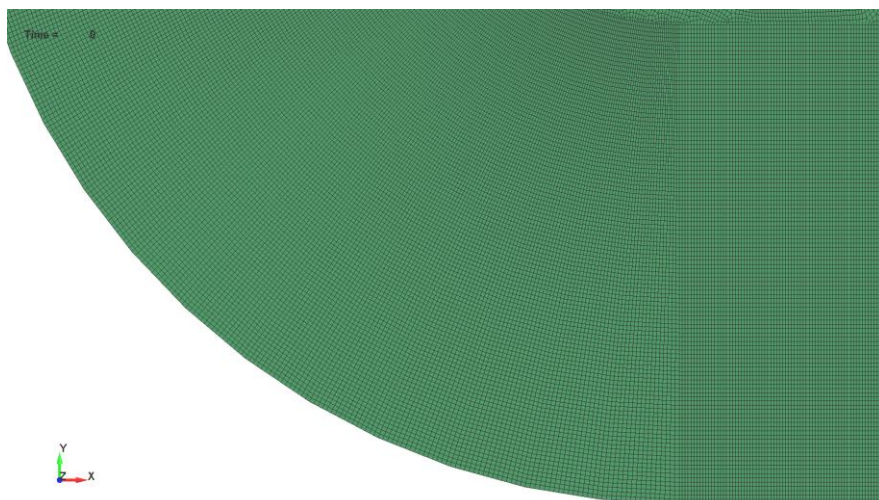


Рис. 13. КЭМ заготовки (радиусная часть)

Особенности КЭМ матрицы

При создании конечно-элементной модели инструментов (матрица, пуансон) используют модель материала rigid – условно переключаем материал модели с деформированного на жесткий (рис. 14).

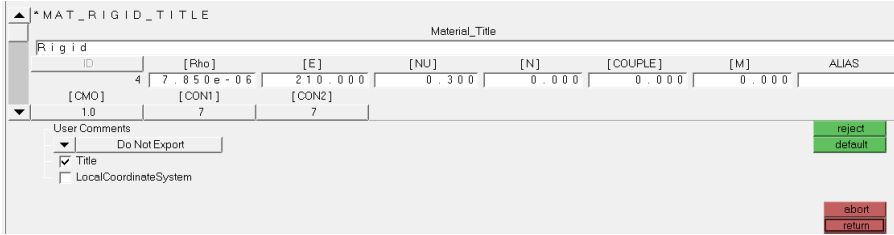


Рис. 14. Задание материала

Первый вариант КЭМ матрицы (рис. 15) приводил к относительным пластическим деформациям, которые достигали 200 % и более. Это показатель того, что модель сформирована некорректно.

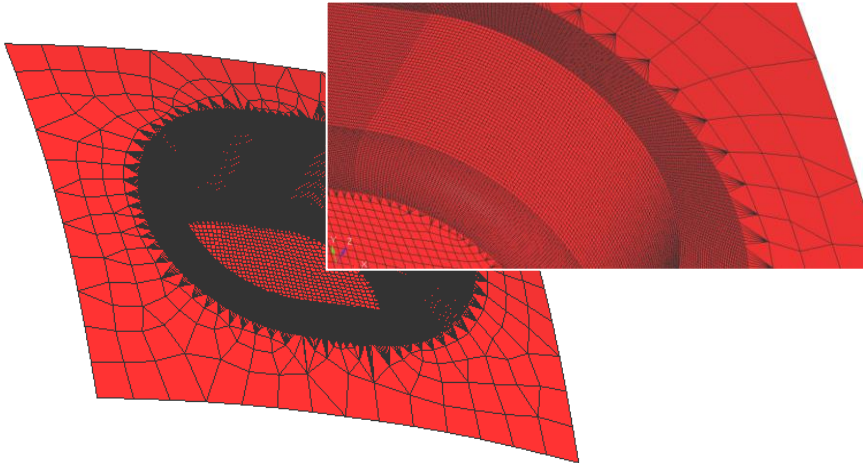


Рис. 15. Первый вариант КЭМ матрицы

Для более точного расчета перестроена КЭМ. Кромка инструмента плавная, количество элементов увеличилось (рис. 16).

Общим правилом построения КЭМ является выровненность сетки вдоль волны деформаций, ее упорядоченность и соразмерность. Так как расчеты проводились с использованием объемных элементов (ELEMENT_SOLID) с 4 элементами по толщине, то размер одного ребра элемента был 0,125 мм. Для соразмерности длины остальных ребер были взяты около 0,3 мм, т.е. в соотношении 1/3.

Для обеспечения более точной обработки контактного взаимодействия КЭМ матрицы и пуансона в местах контакта была сделана соразмерной КЭМ заготовки.

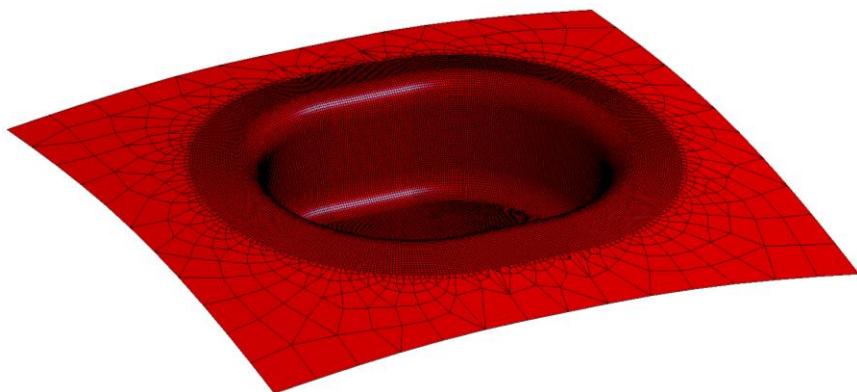


Рис. 16. КЭМ матрицы

После всех проделанных шагов переходим к заданию граничных условий, которые задаются на узлы заготовки, лежащие в плоскости симметрии. В данном случае необходимо задать граничные условия для плоскости симметрии Z-X и для плоскости симметрии Z-Y:

ANSYS Main Menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Constraints → Apply → On Nodes.

В появившемся окне «Apply U, ROT on Nodes» в окне строки «Lab2 DOFs to be constrained» выделить UY, ROTX, ROTZ. В результате на выделенных узлах высветятся стрелки, отображающие запрет на перемещение и вращение вдоль и вокруг заданных осей координат (рис. 17).

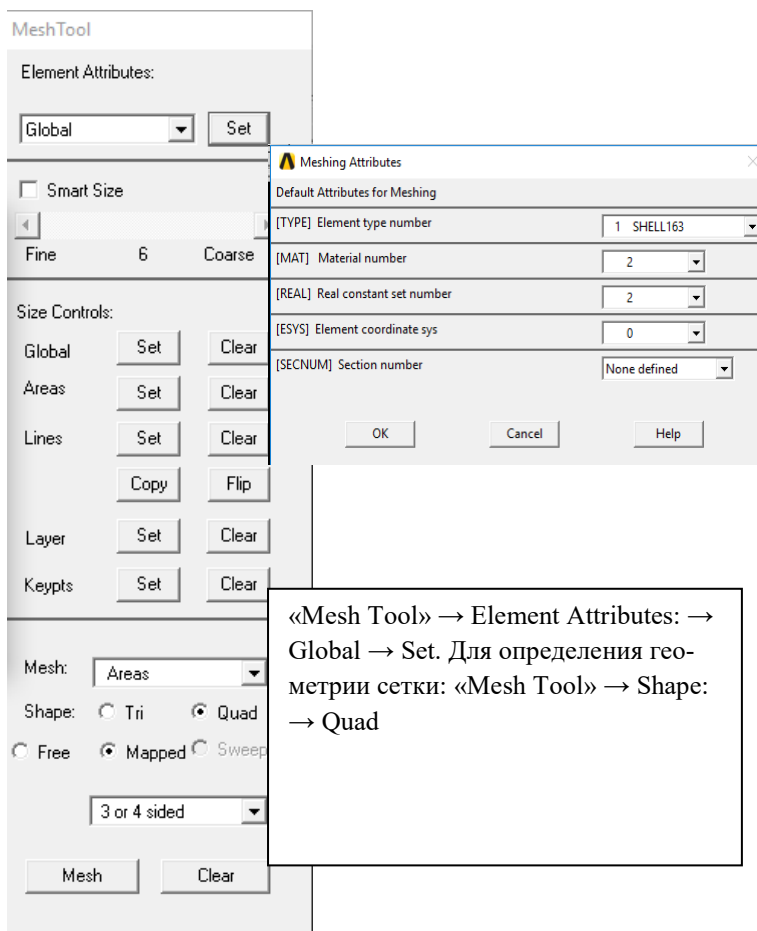


Рис. 17. Диалоговое окно задания конечно-элементной сетки

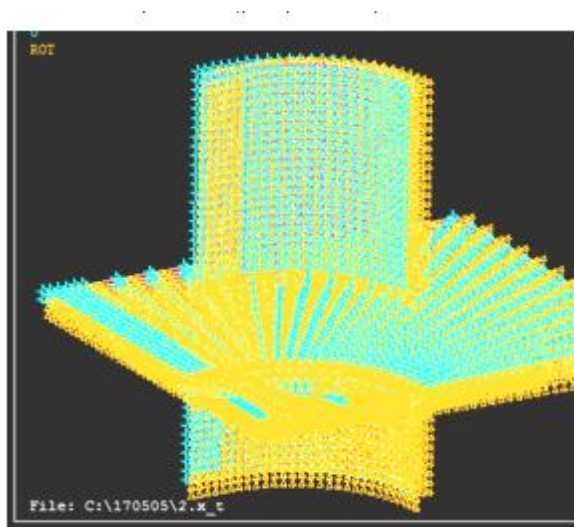


Рис. 18. Задание граничных условий

В качестве кинематических нагрузок зададим перемещение на пуансон и усилие на прижим (рис. 18).

В результате моделирования получена статическая задача – вытяжка коробчатой детали (рис. 19). Где наглядно видны все неровности края, перемещение и напряженно-деформированное состояние изделия после технологической операции.

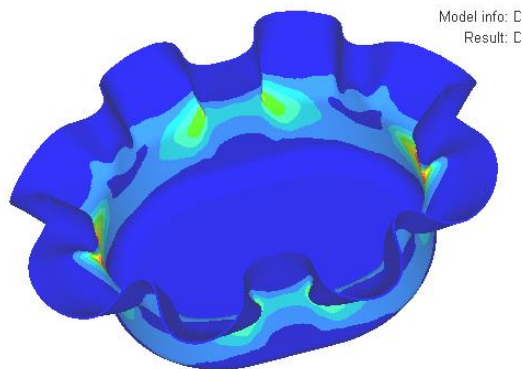


Рис. 19. 9 НДС заготовки после вытяжки

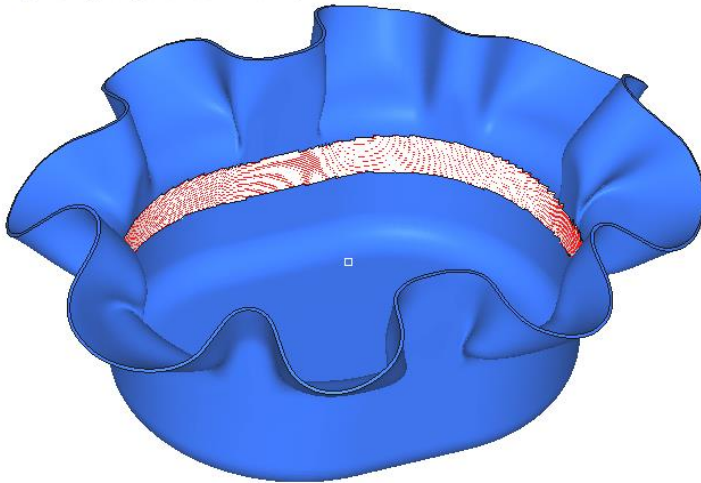


Рис. 20. Место обрезки-припуска после первого перехода

После первого расчета – вытяжки предлагается осуществить обрезку – припуск с помощью импульсного магнитного поля (рис. 20). Использование EM_ модуля LS-Dуна для расчета обрезки затруднительно по причине аварийного прерывания расчета во время симуляции. Связано это с тем, что при комбинированном решении вытяжки – обрезки припуска EM модуль использует решатели неявным и явным методами и при переходе с одного процесса на другой исчезновение элементов (материал разрушения при обрезке) приводит к ошибкам и аварийной остановке математического расчета.

Поэтому в расчетах воздействие импульсного магнитного поля заменено эквивалентным давлением по поверхности (рис. 21).

При обрезке заготовки и в состоянии контакта с оправкой на кромку заготовки действуют окружные усилия (деформации). В модели материала заготовки был добавлен фактор разрушения, возникающий при достижении 14% пластических деформаций.

=====

DEFINE cards

=====

DEFINE_CURVE

```
: Cross-reference summary for Load-curve 1
: -----
: Load segment set definition <No label>: Segment pressure vs time
: X axis : Time (Units: Time)
: Y axis : Segment pressure (Units: Pressure)
: Usage: Transient analysis

HMCURVE 1 1 2 press 1.0 5.0E-2 0.0 0.0 0
          0 0.0 0.0
          100.00000 1000.0000
          1000.0000 1000.0000
```

Рис. 21. Задание кривой нагрузки от времени

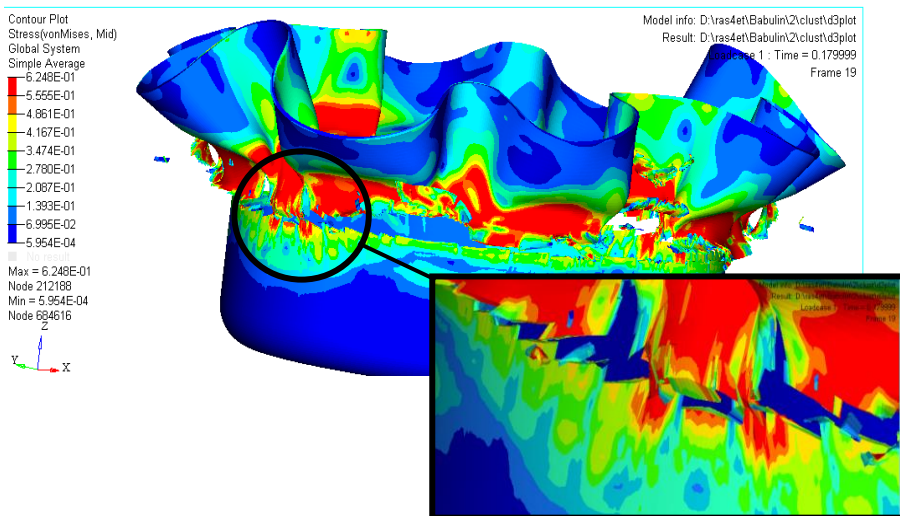


Рис. 22. НДС заготовки после обрезки

В результате получаем готовое изделие (рис. 23).

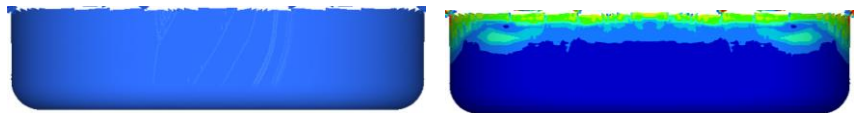


Рис. 23. Общий вид полученной детали

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие позволило познакомиться с моделированием процессов ОМД, приобрести навыки практической работы с использованием изложенной в пособии методики. Кроме того, пособие обеспечивает адаптацию студентов, инженеров к освоению и пониманию программных продуктов и использование их в решении реальных производственных задач.

Использование математического моделирования позволяет повысить уровень производства и решать более сложные технологические задачи за более короткий срок. Развитие программных продуктов и применение их в решении технологических задач определяют развитие производства, позволяющее применять более современные методы обработки металлов давлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением [Электрон. текстовые и граф. дан.]. М.: Разработки программистов МИСиС.
2. Сидоров А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением. [Электрон. текстовые и граф. дан.] // САПР и графика. 2007. №10.
3. Белов М.И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД // Пластическая деформация сталей и сплавов. М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 1996. С. 224-227.
4. Дубинский С. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0. [Электрон. текстовые и граф. дан.] // САПР и графика. 2004. № 3.
5. ANSYS/LS-DYNA User`s Guide for Release 8.1.
6. Машиностроение. Каталог 2010-2011. Группа компаний CSoft.
7. Oasys LS-DYNA Environment: User Guide (Version 8.1).
8. LS-DYNA Keyword user`s manual. July 2006. Version 971.
9. LS-Dyna. Единицы измерения М.: ProCAE. [Электрон. текстовые и граф. дан.].
10. Мощь нелинейных возможностей. Ansys Solution 2000, Volume 2, Number 1.
11. Басок К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. М.: ДМК Пресс, 2006. 248 с.
12. Твердотельное моделирование и построение сетки в Ansys Версия 5.3. / Под ред. Б.Г. Рубцова и др.. Снежинск, 1998.
13. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. Bradley N. Maker, Xinhai Zhu, Livermore Software Technology Corporation, April, 2000.

14. Моделирование и расчеты в программе Ansys [Электрон. текстовые и граф. дан.]. М.: Дистанционное обучение по специальности – Инженерная графика.
15. Филимонов В.И. Теория обработки металлов давлением: курс лекций. Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 209 с.
16. Применение программы математического моделирования LS-DYNA для разработки оптимальных технологических процессов [Электрон. текстовые и граф. дан.].

Учебное издание

Беляева Ирина Александровна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ОМД**

Учебное пособие

Редактор Т.К. К р е т и н и н а
Компьютерная верстка Л.Р. Д м и т р и е н к о

Подписано в печать 20.03.2019. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 5,5.

Тираж 100 экз. (1 з-д 1-25). Заказ .

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

