С.Л. Новокщенов А.В. Демидов В.И. Корнеев

САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Учебное пособие



Воронеж 2015

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

С.Л. Новокщенов А.В. Демидов В.И. Корнеев

САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2015

УДК 621.882

Новокщенов С.Л. САПР технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (7,0 Мб) / С.Л. Новокщенов, А.В. Демидов, В.И. Корнеев. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024х768; MS Word 2007 или более поздняя версия; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии представлены материалы по методикам и программному обеспечению, применяемым при проектировании технологических процессов (формоизменяющих операций) получения изделий объемной штамповкой. По каждому из разделов дается информация, необходимая и достаточная для освоения данного курса, которую студент должен знать и владеть в совершенстве. Приводятся необходимые иллюстрации и справочный материал.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 150700.62 «Машиностроение» (профиль подготовки «Технологии, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»), дисциплине «САПР технологических процессов обработки металлов давлением»

Рецензенты: кафедра теоретической и прикладной механики Воронежского филиала Московского государственного университета путей сообщений (д-р техн. наук, проф. В.С. Семеноженков); д-р техн. наук, проф. Ю.С. Ткаченко

© Новокщенов С.Л., Демидов А.В., Корнеев В.И., 2015

© Оформление. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2015

введение

Научно-технический прогресс ведет к стремительному росту объема информации, которую специалисты-проектанты должны учитывать в своей повседневной работе. С постепенным развитием возможностей технического и программного обеспечения, системы автоматизированного проектирования (САПР) начали внедряться в конце 50-х гг. ХХ века для технических расчетов, в 60-х гг. ХХ века — для проектноконструкторских работ (ЭВМ использовалась в режиме пакетной обработки данных). Сегодня появляются технологии, позволяющие объединить имеющиеся решения в единой рабочей среде автоматизированного проектирования (САПР).

В настоящем учебном пособии подробно рассмотрим специализированные САПР технологических процессов обработки металлов давлением (САПР ТП ОМД), применяемые для автоматизации инженерных расчетов, и которые позволяют проектировать на ЭВМ технологические процессы горячей штамповки и штампы, выдавая всю необходимую технологическую информацию (рис. 1). Человек участвует только в кодировании исходных данных.

Возможны два принципиально различных способа автоматизированного проектирования:

1) синтез проектируемого объекта (конструкции, технологического процесса, цеха) применительно к заданным конкретным требованиям и технико-экономическим условиям при крупносерийном и массовом выпуске продукции (индивидуальное проектирование);



Рис. №1 - Интерфейс САПР ТП ОМД QForm-2D

2) поиск с использованием информационно-поисковых систем по заданным характеристикам типового или группового объекта из имеющейся в памяти ЭВМ номенклатуры объектов для предприятий с единичным, мелкосерийным и серийным характером производства (групповое или типовое проектирование).

Например, при проектировании типовых и групповых технологических процессов штамповки в САПР ТП, предусматривается возможность усечения имеющегося в памяти ЭВМ группового процесса на «комплексную деталь», в которой соединены все возможные элементы и их сочетания для выбранного класса деталей. Описание группового технологического процесса для комплексной детали представляет собой список технологических операций (технологический маршрут) с закрепленными за каждой из них оборудованием и оснасткой.

Технологический процесс для каждой конкретной детали, принадлежащей данной группе, определяется выбором из группового технологического процесса операций необходимых для изготовления этой детали.

При выборе операций используют формализованные правила (условия), устанавливающие соответствие технологических, конструктивных и производственных параметров детали, с одной стороны, и операций технологического процесса, размеров и типов оснастки — с другой. Такие САПР ТП предназначены в основном для предприятий с единичным и мелкосерийным производством.

На предприятиях с массовым и крупносерийным производством повышаются требования к качеству проектного решения.

Даже незначительное уменьшение, например, расхода металла или трудозатрат в одном технологическом процессе дает большой экономический эффект при изготовлении сотен тысяч и миллионов деталей.

При этом необходимы индивидуальное проектирование (синтез) технологического процесса и оснастки применительно к изготовляемой детали с учетом особенностей ее формы и размеров и возможностей используемого технологического оборудования, а также оптимизация проектного решения (рис. №2).

Процесс проектирования разбивают на элементарные, но универсальные операции (элементы расчетов, принятия реше-

ний, геометрических преобразований и др.), каждая из которых уже не зависит от особенностей деталей и проектируемых процессов.



Рис. №2 – Моделирование технологического процесса изготовления изделия «шатун»

Однако в совокупности комплекс элементарных операций обеспечивает принятие решения для деталей любых форм и технологических требований для выбранного класса задач.

ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

1.1. Историческое развитие и наследие

В 70-х гг. XX века появление мини-ЭВМ и терминалов (рисунок №3) дало возможность получать с помощью САПР ТП чертежи и графики в интерактивном режиме при небольших трудовых и финансовых затратах.



Рис. №3 - ЭВМ 70-80-х годов

САПР позволяет ускорить процессы проектирования и повысить качество проектов, быстрее использовать новейшие достижения науки и техники, лучше удовлетворять потребности в новых изделиях. Процессы автоматизированного проектирования и автоматизированного производства объединяют не только функции конструирования изделий, выполнения необходимых чертежей и разработки программ для оборудования с числовым программным управлением (основные функции систем САПР), но также целый набор функций, связанных непосредственно с управлением технологическими процессами и производством.

Объединение функций проектирования и управления технологическими и производственными процессами в одной системе автоматизированного проектирования дает наибольший эффект при создании гибких производственных систем.

Как отмечает Г.Л. Смолян, широкая и комплексная автоматизация различных процессов на базе использования ЭВМ есть нечто большее, чем замена ручного труда машинным, это не просто управление машинами с помощью других машин, как нередко представляется на первый взгляд; появляется новая, «интеллектуальная технология», охватывающая все в принципе возможные объекты управления — операции, ресурсы, оценки.

Переход к этой новой «технологии», использующей ЭВМ, в историческом плане, по-видимому, куда более революционен, чем появление поточного производства, конвейерных линий и систем автоматического регулирования.

При освоении этой новой технологии очень важно рационально распределить функции между человеком и ЭВМ особенно при решении вопроса об автоматизации принятия решений. Решения могут приниматься в условиях определенности, риска или неопределенности.

Если условия принятия решений определены, т. е. задача хорошо формализована, для принятия оптимального решения

могут быть использованы известные методы исследования операций, например, при решении оптимизационных задач при автоматизированном проектировании в САПР ТП.

В условиях риска решение принимается на основе стохастических моделей, оценивающих вероятность тех или иных событий.

При этом у специалиста-проектанта отсутствуют точные знания о проектируемом объекте и о закономерностях изменения его показателей (например, о том, как будут изменяться технико-экономические показатели проектируемого процесса при изменении его параметров). Поэтому и наилучшие решения будут получаться с какой-то определенной вероятностью, т. е. не всегда.

Еще более сложным становится принятие решений в условиях неопределенности, когда трудно получить не только достоверную, но и вероятностную оценку качества решений. Часто при проектировании даже самые лучшие эксперты расходятся во мнениях о том, какое решение приведет к успеху, какое — нет.

Как показал опыт, человек, принимая решение в условиях неопределенности, плохо оценивает вероятность будущих событий (большую вероятность назначает событиям, которые он лично чаще встречал), плохо оценивает априорную вероятность, практически неправильно ориентируется в условиях многокритериальной оптимизации, когда число показателей качества решения велико (3 и больше).

В условиях неопределенности у человека проявляется плохая устойчивость (повторяемость) ответов, т. е. в разное время и при разных состоянии здоровья, настроении человека

могут быть получены разные решения в одинаковой ситуации. Часто нетранзитивность ответов: объект А лучше Б, Б лучше В, В лучше А. Человек во многих случаях приспособляет задачу к своим возможностям, искажая ее. Ответ может зависеть также от того, как человеку подана информация.

В то же время опыт функционирования многих систем показал, что одно из главных преимуществ человека, по сравнению с системами, реализующими автоматическое принятие решений, — возможность творческого соотнесения запрограммированных действий и операций с реальностью, их корректирование и выработка эффективных решений и способов поведения в непредвиденных, изменяющихся ситуациях.

Интеллектуальный механизм принятия решения заключается в переработке информации, фактических данных в управляющее воздействие. Главное в такой переработке — выделение из нее смысла или придание ей смысла.

Такое осмысление ситуации с необходимостью связано с элементами субъективного порядка, отражающими целевые, мотивационные, ценностные установки и ориентации лица, принимающего решение.

Именно поэтому механизмы смысловой обработки информации и ее оценки не рутинные, не повторяющиеся, не программируемые. Это обстоятельство во многом задает пределы автоматизации.

В условиях, когда критериев качества принимаемого решения много, выбор наилучшего, по мнению проектанта, решения осуществляется без полного осознания причин и правил выбора именного этого решения, понимания, насколько и почему оно лучше альтернативных.

Конечно, математические модели сложных процессов и систем, реализуемые на высокопроизводительных ЭВМ, дают возможность проектантам увидеть содержание своей деятельности с новых позиций, на более высоком уровне оценить последствия возможных решений, проверить и обосновать интуитивные предположения.

Примером принятия решения в условиях многокритериальности может служить оптимальное автоматизированное проектирование механических цехов, где при наличии десятков тысяч переменных (вариантов деталеопераций) необходимо принять оптимальное решение по выбору числа и типа станков и автоматических линий, чтобы обеспечить выпуск заданной продукции и получить в каком-либо смысле наилучшее сочетание многих показателей проектируемого цеха: стоимости выпуска заданной продукции, объема капиталовложений на приобретение оборудования и строительство, площади цеха, числа работающих, уровня механизации труда, удельного веса прогрессивного оборудования, рациональности его использования и т. п.

При такой многокритериальности (и противоречивости частных целей) отсутствует объективная оценка — какое решение лучше в каждом конкретном случае. Автоматизированная система позволяет имитировать различные варианты проекта цеха при разных ограничениях (по площади, числу работающих, затратам и т. п.), задаваемых проектантом, и давать оценку всех показателей для каждого варианта.

Но выбрать наиболее пригодное решение в каждом конкретном случае должен человек, который получает от ЭВМ дополнительную информацию о том, как изменяются все показатели цеха при разных ограничениях, поэтому его решение хотя и будет субъективным, но опирается на более точные знания о проектируемом объекте.

В работах показано, что применение ЭВМ обеспечивает получение таких проектов строительства и реконструкции цехов, которые требуют приблизительно на 20 % меньше затрат, чем проекты, полученные без моделирования.

Как показывает опыт внедрения на разных предприятиях САПР ТП горячей объемной штамповки, в которых решения принимаются автоматически по имеющимся в САПР ТП алгоритмам, в силу специфики производственных условий каждого завода и бесконечного многообразия форм деталей внедрение САПР ТП на каждом заводе требует проведения трудоемкой работы по корректированию ряда используемых в САПР ТП алгоритмов.

Такого корректирования требуют, в основном, алгоритмы для решения в САПР ТП задач двоякого характера: предсказания и распознавания.

Если модели (и алгоритмы), обеспечивающие решение в САПР ТП горячей штамповки задач предсказания, создаются и корректируются с применением методов теории обработки металлов давлением, математической статистики и других общетехнических дисциплин, то создание и корректирование моделей, обеспечивающих решение в САПР ТП задач классификации и распознавания, до недавнего времени в связи с отсутствием адекватных методов осуществлялось в основном интуитивно или по приближенным алгоритмам, что не всегда обеспечивало высокое качество проектируемых технологических процессов. Методы теории распознавания образов позволяют более эффективно алгоритмизировать эти сложные задачи и обеспечить совершенствование разработанных САПР. Использование некоторых методов обучения распознаванию образов позволило разработать обучающие программы проектирования штампованной поковки.

Как известно, при совершенствовании производственных процессов уточняются и правила проектирования в зависимости от возможностей штамповочного цеха, состояния оборудования, серийности производства и конфигурации штампуемых поковок. Указанные факторы не одинаковы для каждого завода. Следствие этого — существующие разнообразия в применяемых правилах проектирования на различных заводах.

Возникает необходимость в создании САПР ТП, способных обучаться, т. е. в построении дополнительных алгоритмических средств, цель которых — адаптация отдельных алгоритмов и

САПР в целом к различным и изменяющимся производственным условиям. Существующие методы проектирования процессов штамповки, основанные на использовании ГОСТов, нормалей и других технологических рекомендаций, не регламентируют правила принятия решений на всех этапах проектирования, поэтому во многих случаях технолог принимает их на основании специальных знаний, своего опыта и интуиции. Работа технолога по принятию решений в значительной степени творческая, ее трудно формализовать, особенно при решении задач распознавания.

Поэтому в большинстве ранее разработанных САПР ТП эти задачи решались весьма приближенно, главным образом

путем описания в математической форме правил классификации, используемых на практике высококвалифицированными специалистами. Эти правила классификации могли учесть все многообразие производственных условий и поэтому не всегда обеспечивали высокое качество проектируемых технологических процессов.

Применение математических методов обучения распознаванию образов обеспечивает автоматизированное решение задач распознавания. Методы теории обучения распознавания образов можно использовать и при построении и корректировании при помощи методов математической статистики (корреляционного и регрессионного анализа) моделей (алгоритмов) САПР ТП, обеспечивающих решение задач предсказания.

Эффективность автоматизированного проектирования существенно повышается при адаптации САПР ТП вследствие использования методов оптимизации проектных решений, поскольку при поиске оптимальных решений о помощью ЭВМ учитываются конкретные условия производства.

1.2. Современное состояние и опыт применения

При помощи методов математического моделирования с применением САПР ТП в настоящее время решаются следующие технологические задачи обработки металлов давлением:

1) Прогнозирование возникновения дефектов в заготовке. На рис. 1 (слева) представлен результат моделирования процесса прессования детали из алюминия в программном комплексе DEFORM 3D (рис. №4).



Рис. №4 - Главное окно ПО Deform-3D

Как хорошо видно на рисунке, на дне стакана образуется складка. Этот дефект был выявлен и в ходе заводских испытаний (рис. 1, справа).

2) Разработка новых технологических процессов. В условиях жесткой конкуренции современного рынка перед технологическими службами предприятий встает задача получения в сжатые сроки поковок сложной формы при жестких допусках на размеры и малой себестоимости.



Рис. №5 - Прессование детали из алюминия моделировалось в программном комплексе DEFORM 3D

Еще десять лет назад косозубое зубчатое колесо получали механообработкой из круглой поковки или из прутка. Сегодня такие поковки можно получать путем холодного прессования или горячей объемной штамповки с зубьями, близкими по форме к окончательному виду.

При разработке технологического процесса получения такого типа поковок методами ОМД широко применяется компьютерное моделирование в DEFORM 3D (рис. 2).



Рис.№6 - Моделирование широко применяется при разработке технологических процессов холодного прессования зубчатых колес (слева) либо получения их методами горячей объемной штамповки

3) Оптимизация существующей технологии. На рис. 3 представлены технологические переходы штамповки проушины баллона для сжатого воздуха.

Этот процесс имел ряд недостатков, таких как быстрый износ инструмента, образование складок, трудности удаления заготовки из полости штампа. Вследствие этого на выходе получалось около 11% брака.

Для минимизации всех нежелательных эффектов было предложено несколько различных вариантов незначительной модернизации процесса. Моделирование этих вариантов (нагрев

заготовки и последующая ее штамповка) проводилось при помощи программного комплекса DEFORM 3D.



Рис.№7 - Благодаря моделированию процесса получения проушины баллона для сжатого воздуха процент брака удалось снизить с 11 до 3%

Моделирование позволило оценить влияние на конечный результат каждого из этих вариантов. В частности, было определено оптимальное количество ударов (с максимальной энергией) молота, необходимых для заполнения полости штампа.

Кроме того, в процессе моделирования производилось незначительное варьирование геометрией инструмента, что позволило найти ее оптимальную форму.

Также были даны рекомендации по оптимальной температуре нагрева заготовки с учетом времени ее транспортировки от печи к молоту. Таким образом, процент брака при производстве проушины был снижен до 3.



Рис. №8 - Кованая балка моста до термообработки (белым) и после (желтым)

Как видно из вышеперечисленных примеров, на данный момент моделирование позволяет заглянуть в суть технологического процесса ОМД (оценить напряженно-деформированное состояние в заготовке), оптимизировать параметры процесса, но не разработать его за технолога.

Таким образом, опыт технолога и его квалификация попрежнему остаются важнейшими составляющими разработки технологического процесса, а моделирование лишь помогает ему подтвердить или опровергнуть свои идеи.

Однако дальнейшее развитие средств оптимизации, скорее всего, приведет ко все большему вмешательству машины в процесс разработки технологического процесса.

1.3. Перспективы развития САПР ТП

Моделирование технологических процессов продолжает свое дальнейшее развитие. Наиболее перспективными направлениями на сегодня являются следующие:

Моделирование процессов термической обработки. Моделирование процессов термической обработки — гораздо более сложная задача, нежели моделирование процессов формоизменения. Это обусловлено более сложными процессами в материале заготовки, проходящими на микроструктурном уровне.

На практике наиболее интересным для технолога представляется прогнозирование механических свойств заготовки и искривления ее формы. На рис. 4 представлен результат моделирования с помощью DEFORM HT3 термообработки кованой балки моста. Белый цвет соответствует форме балки до термообработки, желтый — после. В данном случае наибольшее изменение объема заготовки произошло при переходе материала из аустенита в мартенсит.

Искажения при механической обработке. ОМД и термическая обработка ведут к возникновению в заготовке внутренних напряжений. Эти внутренние напряжения после снятия всех нагрузок вследствие искажения формы заготовки приходят в равновесие.

В настоящий момент DEFORM позволяет осуществлять лишь моделирование возникновения искажений при механической обработке осесимметричных заготовок. Работа по внедрению этой функции в DEFORM 3D продолжается.

Вопросы для самоподготовки:

1. Охарактеризуйте этапы развития систем автоматизированного проектирования?

2. Опишите возможности современных систем автоматизированного проектирования технологических процессов обработки металлов давлением?

3. В чем выражаются перспективы развития САПР ТП обработки металлов давлением?

ГЛАВА 2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ, СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ФУНКЦИОНАЛ МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Структура и взаимосвязь программных модулей САПР ТП ОМД

Работы по созданию специализированного программного продукта для моделирования процессов ковки и объемной штамповки начались в США в 70-х годах XX века.

Математический аппарат, основанный на моделировании вязко-пластического течения металла методом конечных элементов, был разработан в это же время, такими известными учеными, как Ли, Кобаяши, Парк и другими.

Основной проблемой, тормозящей развитие программных средств моделирования процессов ковки и объемной штамповки в то время являлась низкая производительность компьютеров.

Виртуальное производство сегодня использует современные мощные компьютеры для имитации процесса изготовления продукта и производственных процессов.

Оно применяет методы нелинейного конечно-элементного анализа (FEA) для получения детальной информации о продукте, которая далее используется для оптимизации таких факторов, как технологичность изготовления, конечная форма, уровни остаточных напряжений и срок службы изделия. Существует три основных типа нелинейностей:

1. материальные – пластичность, ползучесть, вязкоупругость;

2. геометрические – большие деформации или растяжения, резкие изгибы;

3. граничные – контакты, трение, щели, дополнительные силы.

Метод конечных элементов работает на основе расщепления геометрии объекта на большое число (тысячи или десятки тысяч) элементов (например, параллелепипедов). Эти элементы образуют ячейки сети с узлами в точках соединений. Поведение каждого малого элемента стандартной формы быстро рассчитывается на основе математических уравнений.

Суммирование поведения отдельных элементов дает ожидаемое поведение целого объекта. Материал и структурные свойства ячейки определяют, как деталь реагирует на определенные нагрузки. По существу, FEA является численным методом решения различных инженерных задач, таких как анализ напряжений, теплопередача, электромагнитные явления и течение жидкостей.

Анализ FEA родился и вырос в автомобильной и аэрокосмической промышленности, однако, далее распространился на все другие сектора индустрии: производство медицинских инструментов, изделий из пластмасс, часов и др. FEA в результате обеспечивает компьютерную имитацию (моделирование) целых процессов, в которых создается и испытывается физический образец, который далее модифицируется и повторно испытывается до тех пор, пока не будет создана приемлемая конструкция. Материал и структурные свойства ячейки определяют, как деталь реагирует на определенные нагрузки. По существу, FEA является численным методом решения различных инженерных задач, таких как анализ напряжений, теплопередача, электромагнитные явления и течение жидкостей. FEA в результате обеспечивает компьютерную имитацию (моделирование) целых процессов, в которых создается и испытывается физический образец, который далее модифицируется и повторно испытывается до тех пор, пока не будет создана приемлемая конструкция. Тем не менее, FEA не означает замены испытаний образцов, а дополняет их.

Первые системы могли решать только двумерные задачи для осесимметричных поковок, что позволяло использовать относительно простые расчетные алгоритмы и свести время расчетов к более-менее приемлемым величинам. 2D-системы также позволяют моделировать процессы плоской деформации.

Среди отечественных 2D-систем наиболее распространены системы Form-2D и QForm фирмы "Квантор-Софт". 3Dсистемы появились лишь во второй половине 90-х годов XX века. Техническое обеспечение современных систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) (рис. 35) обеспечивают персональные компьютеры (ПК) (мощностей современных ПК вполне достаточно), струйные принтеры формата A0, лазерные принтеры формата A4, которые входят в состав автоматизированных рабочих мест (APM).

Методическую базу САПР ТП составляют математические и эвристические модели процессов технологического проектирования и конструирования, методы принятия рациональных и оптимальных проектных решений, способы кодирования и математического описания объектов проектирования.



Рис. №9 - Вид рабочего окна САПР ТП QForm

Проектирование строится на базе максимальной стандартизации, унификации и типизации типовых проектных решений. САПР ТП могут основываться как на полной автоматизации, так и на диалоговом режиме. При полной автоматизации участие человека ограничивается подготовкой исходных данных.

Полная автоматизация применяется при решении хорошо формализуемых, как правило, расчетных задач. Диалоговый режим проходит с участием человека и предполагает наличие средств диалогового проектирования и программного обеспечения связи между человеком и ЭВМ. В диалоговом режиме человек имеет возможность оперативно оценивать промежу-

точные результаты проектирования и активно, творчески влиять на его дальнейший ход. Диалоговый режим применяют для решения логически сложных задач, процесс решения которых заранее нельзя описать в виде алгоритма.

САПР ТП заключается в преобразовании на ЭВМ по заранее разработанной программе сведений о штампуемой детали, условиях ее производства, команд проектировщика и информацию о заготовке, последовательности и параметрах технологических операций, применяемом оборудовании, штампах и другой оснастки. Автоматизированное проектирование выполняется с помощью САПР - организационно-технической системы, состоящей из средств методического, программного, информационного, технического и организационного обеспечения. Информационное обеспечение включает библиотеки стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, конструктивных элементов, комплектующих изделий и материалов, образующие в совокупности базу данных. Последовательность разработки конструкторско-технологической документации включает в себя следующие этапы:

1) чертеж поковки с техническими условиями;

2) габаритные чертежи штампов; рабочие чертежи сменных деталей штампов;

 рабочие чертежи шаблонов для контроля поковки и ручьев штампов;

4) карта технологического процесса штамповки.

Технологическая документация представляется в текстовой и графической форме: маршрутные и операционные технологические карты, которые содержат результаты технологического проектирования. Наибольшую эффективность подготовки конструкторской документации обеспечивают системы интерактивного взаимодействия проектировщика и ЭВМ.

Одним из основных принципов, на которых строится структура программного обеспечения, является принцип совместимости подгрупп программных модулей, реализующих либо модельное представление компонент объектов проектирования, либо формализуемые проектные процедуры.

Такие программы имеют в своем составе: монитор системы, подсистему геометрического моделирования и базу данных, которые вместе образуют препроцессор системы (рис. 36). Ядро системы основано на конечно-элементной термомеханической модели процесса и автоматическим генератором сеток. Графический постпроцессор обеспечивает анализ формоизменения металла в течение всего процесса деформирования металла в инструменте, включая:

1) конечно-элементную сетку;

2) векторное поле течение металла;

3) поля изолиний скоростей, напряжений, деформаций, скоростей деформаций и температуры в заготовке;

4) распределение контактных давлений на поверхности инструмента;

5) графики усилия, работы и мощности деформации;

6) вмороженную лагранжеву сетку;

7) геометрические размеры поковки.

Конечно-элементные алгоритмы решения исходной системы уравнений САПР технологических процессов включают в себя следующие этапы:

1) дискретизацию системы уравнений вязко-пластического течения металла;

2) дискретизацию уравнений теплопроводности;

3) автоматическую генерацию сетки конечных элементов;

4) аппроксимацию реологических свойств материала.

В САПР ТП обычно выделяют три части, или подсистемы: формирования входной информации; проектирования—пакеты прикладных и управляющих программ; формирования выходной информации.

Такие системы работают обычно в автоматическом режиме, имеют многовариантную основу, т. е. могут быть нацелены на процесс перепроектирования, если полученный результат по тем или иным причинам не устраивает проектировщика. Идентичные элементы систем САПР в зарубежной литературе имеют следующую аббревиатуру:

- подсистема формирования входной информации — **PREPROCESSOR**;

- подсистема проектирования — **PROCESSOR**;

- подсистема формирования выходной информации — **POSTPROCESSOR**.

Сердцевиной, центральной частью современных САПР является ее ядро (**PROCESSOR**).

Ядро – это библиотека основных математических функций САD-системы, которая определяет и хранит внутримашинное представление объекта проектирования, ожидая команды пользователя, и выполняет управление графикой в реальном масштабе времени.

Ядро САПР, предназначенной для автоматизации проектирования конструкций и выпуска конструкторской документации должно обеспечивать функции: 1. управление работой всех прикладных программ, пользователей и операторов, включая настройку программного обеспечения на конкретные условия функционирования;

2. разделение работ по выпуску конструкторской документации (КД) на отдельные этапы (расчет, обработка и выпуск КД);

3. формирование заданий на подготовку и накопление их в очереди к соответствующим компонентам САПР для выполнения;

4. использование графических баз данных и баз данных спецификаций для подготовки КД;

5. передача заданий на подготовку и выпуск КД по сети в случае специализации автоматизированных рабочих мест;

6. получение твердых копий КД на соответствующих устройствах;

7. ведение графических баз данных и баз данных спецификаций;

8. накопление статистики о работе прикладных программ, работе пользователей и операторов, а также об объемах выпущенной документации.

В САПР технологических процессов сетка конечных элементов строится и перестраивается в ходе расчета автоматически. Исходными данными для генерации сетки конечных элементов является форма заготовки, а также геометрия инструмента. Форма заготовки, соответствующая начальной ее конфигурации, вводится пользователем.



Рис. 10. Структурная схема систем САПР ТП

На всех следующих шагах она является результатом решения на предыдущем шаге. Метод конечных элементов (МКЭ) и высокопроизводительные компьютеры создали предпосылки для дальнейшего развития численного моделирования процессов формоизменения металлов, которое в дальнейшем для краткости мы будем называть технологическим моделированием. Результаты расчета с использованием подобных методик содержат:

 полную картину формоизменения металла в течение всего процесса деформирования включая поля скоростей, напряжений, деформаций, скоростей деформации и температуру в поковке;

- энергосиловые параметры процесса;

- распределение контактных напряжений на поверхности инструмента;

- предсказание возможности образования дефектов и анализ проработки металла и текстуры.

Генерация сетки включает в себя несколько этапов:

 разбивка границы заготовки на отрезки. На этом этапе выделяются участки контакта с инструментом, а также участки свободной поверхности. Последние разбиваются на одномерные криволинейные квадратичные элементы с переменной плотностью узлов с учетом кривизны поверхности заготовки;

 генерация треугольных элементов, начиная от узлов, расположенных на границе. В качестве критериев генерации нового элемента берутся величина угла между соседними отрезками и их длины;

 перенумерация элементов с целью минимизации ширины фронта. По завершении построения сетки на всех шагах по времени, кроме начального, производится пересчет значений полей для новых узлов.

В общем случае на поверхности контакта металла и инструмента имеются зоны скольжения и прилипания, протяженность и расположение которых зависят от форм штампа и заготовки, стадии процесса, условий трения, температуры, скорости движения штампов и других параметров.

Полная система уравнений вязко-пластического неизотермического течения металла в эйлеровой системе координат применительно к задачам горячей обработки металлов давлением включает в себя:

уравнения движения без учета массовых сил:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \frac{dv_i}{dt} = 0 \tag{2.1}$$

кинематические соотношения:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(v_{ij} + v_{j,i} \right) \tag{2.2}$$

уравнение несжимаемости:

$$v_{i,j} = 0$$
 (2.3)

определяющие соотношения, связывающие девиаторы тензоров скоростей деформации и напряжений:

$$\sigma_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\varepsilon} \varepsilon_{ij}$$
(2.4)

уравнение теплопроводности:

$$c\rho T = k_i T_i i + \beta \,\sigma\varepsilon \tag{2.5}$$

реологическое уравнение:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma} \left(\frac{1}{\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}, T} \right). \tag{2.6}$$

Краевые условия на участках скольжения металла по инструменту являются смешанными и включают в себя кинематическое ограничение и уравнение для касательных напряжений на границе, задающее закон трения.

Реализация этих условий представляет наибольшую сложность для численного моделирования методом конечных элементов, поскольку в силу нелинейности и наличия ограничений в виде неравенств они не могут быть непосредственно включены в результирующую систему уравнений.

Таким образом, граничные условия до начала решения мгновенной квазистационарной задачи могут быть заданы лишь с некоторой степенью приближения с последующим итерационным уточнением. При этом определяются узлы, в которых выполняется условие отрыва, и граничные условия в них заменяются, а также уточняются касательные напряжения на остальных участках скольжения.

Анализ технологического процесса строится на основе решения систем уравнений вязко-пластического течения металла и уравнений теплопроводности, выполняемые в едином итерационном цикле, оканчивающимся при достижении условия сходимости для соответствующих функций.

Сходимость итерационного процесса контролируется относительной нормой разности решений и вычисления прекращаются при достижении условия:

$$\frac{\left\|\left\{\vec{v}\right\}_{\cdot} - \left\{\vec{v}\right\}_{\cdot, \ast}\right\|}{\left\|\left\{\vec{v}\right\}_{\cdot}\right\|} \boldsymbol{s}_{\delta_{\cdot}} \cdot \frac{\left|P_{\cdot} - P_{\cdot,\ast}\right|}{\left|P_{\cdot}\right|} \boldsymbol{s}_{\delta_{\cdot}}, \qquad (2.7)$$

где d1, d2 – заранее заданные малые числа; $\|\tilde{v}\|$ - норма скорости Эвклидова пространства.

При дискретизации системы уравнений вязкопластического течения металла вводится понятие виртуальных скоростей.

При выводе дискретных уравнений используют матрицыстолбцы для компактного обозначения векторов и тензоров.

Аппроксимация сопротивлений пластической деформации осуществляется непосредственно на основе экспериментальных данных, представленных в виде таблиц или графиков, с использованием 3-мерных кубических сплайнов на неравномерной

сетке. Сплайн-аппроксимация σ осуществляется в трехмерной

области (параллелепипеде), ограниченной минимальными и максимальными значениями параметров.

Совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, примененных в САПР ТП, называют *математическим обеспечением системы*.

Основу математического обеспечения САПР ТП составляют *алгоритмы* и *методики решения* задач технологического проектирования.

Алгоритмом называют конечный набор предписаний для получения решения задачи посредством конечного числа операций (действий). В соответствии с алгоритмами разрабатывают впоследствии программное обеспечение и выполняют автоматизированное проектирование.

Разработка математического обеспечения является самым сложным этапом создания САПР ТП, от которого в наибольшей степени зависит эффективность ее работы.

Математическое обеспечение САПР ТП включает в себя:

- математические модели объекта проектирования (ТП или его фрагментов), а также предмета производства (детали, сборочной единицы) в состояниях, соответствующих различным этапам проектируемого ТП;

- формализованное описание принятой технологии автоматизированного проектирования.

Математические модели, применяемые для исследования технологических процессов в современных САПР ТП ОМД основываются на методе конечных элементов (МКЭ).

В настоящее время в САПР ТП ОМД наиболее распространены следующие методы вычислительной математики: 1) математическое моделирование с помощью метода конечных элементов (МКЭ);

2) физическое моделирование с применением пластометов;

 физическое моделирование с применением теорем подобия;

4) статистические модели;

5) моделирование с помощью нейросетей.

2.2 Природа и механизм пластической деформации и разрушения металла

Пластическая деформация металлов осуществляется в основном путем параллельного смещения тонких слоев (скольжение). При этом производится некоторая механическая работа, затрачиваемая на деформацию тела, которая превращается в энергию трех видов: кинетическую, тепловую и потенциальную.

Потенциальная энергия состоит в свою очередь из двух частей: упругой (обратимой) и поглащенной (необратимой).

Упругая часть потенциальной энергии вызывает изменение межатомных расстояний вещества. После прекращения действия внешней силы атомы вновь занимают исходное положение устойчивого равновесия, а упругая часть потенциальной энергии полностью или частично возвращается в виде механической работы.

Поглощенная часть потенциальной энергии остается в теле после снятия нагрузки, вызывая искажения кристаллической атомной решетки.

Пластическое течение может начаться лишь после того, что как накопленная в теле потенциальная энергия превысит некоторую величину, которая зависит от физических свойств деформируемого вещества и от термомеханического режима деформирования (температуры, скорости и напряженнодеформированного состояния).

Многочисленными опытами было установлено, что при больших деформациях, которые характерны для большинства процессов обработки металлов давлением, подавляющая часть затраченной механической работы переходит в тепловую энергию.

При достаточно большой длительности процесса формоизменения тепловая энергия рассеивается в окружающую среду, не вызывая существенного повышения температуры тела. При малой длительности процесса тепловая энергия не успевает рассеяться, что заметно повышает среднестатистическую температуру в очаге интенсивной пластической деформации.

При динамическом характере приложения нагрузки преимущественное развитие тепла происходит по плоскостям наиболее интенсивных сдвигов. На этих плоскостях температура может значительно превысить среднестатистическую температуру всего тела и достигнуть критического значения, при котором в металле происходят внутренние превращения.

Разогрев металла может оказать существенное влияние на процесс пластического деформирования, вызывая сложные физико-химические явления.

Как известно, под влиянием внешних сил в деформируемом теле возникают внутренние силы сопротивления, которые
характеризуются величиной интенсивности, действующей на элементарную площадку, и называются напряжениями:

$$\sigma = \frac{dP}{dF} \tag{2.8}$$

В общем случае направление и величина напряжения зависят от выбранного положения площадки в теле и от ее ориентации.

Вообще же напряженное состояние в какой-либо точке деформируемого тела характеризуется тремя главными нормальными напряжениями и направлениями главных осей, таким образом, существует девять видов напряженного состояния: четыре объемных (трехосных), три плоских (двухосных) и два линейных (одноосных).

Схема напряженного состояния влияет на способность металла претерпевать необратимые деформации не разрушаясь и на величину внешней силы, которую необходимо приложить для осуществления остаточной деформации заданной величины.

Деформирование в условиях одноименного объемного напряженно-деформированного состояния требует большее усилие, чем в условиях разноименного напряженного состояния при прочих равных условиях.

Кроме напряжений, деформированное состояние в какойнибудь точке характеризуется тремя главными деформациями и тремя направлениями осей деформации. Возможны три вида деформированного состояния: плоское и два объемных.

Таким образом, один и тот же вид напряженного состояния может сочетаться с различными видами деформированного состояния. Напряженно-деформированное состояние, соответ-

ствующее тому или иному способу формоизменения обычно называют механической схемой деформации, что может быть положено в основу классификации различных процессов обработки металлов давлением.

При некоторой определенной величине напряжений наступает предельное состояние текучести, при котором начинается плоское пластическое формоизменение. При дальнейшем росте напряжений и деформаций наступает второе предельное состояние – разрушение тела.

Тело, пластическая деформация которого осуществляется при постоянной величине сопротивления деформированию, называют идеально пластичным телом.

Так как процессы обработки металлов давлением обычно осуществляются в условиях сложного напряженного состояния, то большое значение при разработке методов анализа и расчета приобретает формулировка условия, определяющего переход деформируемого тела из упругого в пластическое состояние (условие текучести) в зависимости от вида напряженного состояния. Существует несколько гипотез, характеризующих условия перехода металла в пластическое состояние. Наиболее обоснованным экспериментально является условие пластичности Мизеса-Губера.

2.3 Характерные особенности современных методов расчета

При решении ряда задач используются методы приближенного решения уравнений равновесия и пластичности.

Метод совместного решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия и пластичности

При составлении приближенных уравнений равновесия выделяют элементарный объем, ограниченный двумя плоскостями, отстоящими друг от друга на бесконечно малую величину. Решение этих уравнений совместно с приближенным условием пластичности с учетом заданных граничных условий связано с использованием дополнительных упрощений:

 принимается, что первоначально плоские сечения остаются плоскими после пластической деформации (гипотеза плоских течений);

 условно принимают, что нормальные напряжения на плоскостях, ограничивающих элементарный объем, распределены равномерно (осреднение напряжений вдоль одной из координатных осей);

 при составлении приближенного уравнения пластичности напряжения на площадках, перпендикулярных координатным осям, считают главными (пренебрегая наличием касательных напряжений на этих площадках);

4. при решении задач осесимметричной деформации обычно принимают, что два напряжения равны друг другу (полная пластичность);

5. влияние упругих зон в пластически деформируемом теле не учитывается. Это упрощение может быть использовано лишь в некоторых частных случаях, когда размеры упругих зон малы по сравнению с размерами тела, а также в тех случаях, когда упругие зоны являются концевыми.

Принимая гипотезу плоских сечений, обычно ограничиваются определением конечных размеров контурных поверхностей по заданным начальным размерам заготовки, минуя рассмотрение скоростей и перемещений отдельных материальных частиц.

Сущность приближенного метода при этом сводится к определению положения условных границ раздела течения металла, на которых нормальные напряжения имеют максимальное значение \Box max. При анализе сложных процессов формоизменения прибегают к разделению тела на геометрически простые части.

Приложив к поверхности условного разреза осредненные нормальные и касательные напряжения, заменяющие эффект действия связи с другими примыкающими частями тела, в результате решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия определяем положение линий раздела течения металла. Приближенные решения, полученные рассматривают методом, удовлетворяют условию минимума энергии формоизменения. Но существенная ограниченность круга задач, решаемых рассматриваемым методом привело к развитию других методов.

Метод построения полей линий скольжения для плоскодеформированного состояния

В математической теории пластичности в последнее время получила применение схема жесткопластического тела, учитывающая, что деформируемое тело состоит из областей развитой пластической деформации и упругих зон.

При этом напряжения и деформации в упругих зонах не рассматривают, так как считают эти зоны абсолютно жесткими. Использование схемы жесткопластического тела при анализе процессов обработки металлов давлением оправдывается тем, что деформации в упругих зонах при этих процессах несоизмеримо малы по сравнению с деформациями в пластических зонах.

Сущность метода заключается в построении сеток линий скольжения в пластических зонах тела. Он применим лишь для плоскодеформированного и плосконапряженного состояний, которые в реальных условиях обработки металлов давлением почти никогда не осуществляется в чистом виде. С помощью этого метода можно решать следующие задачи обработки металлов давлением:

к первой категории относятся многочисленные кинематически простейшие случаи, при которых размеры деформированного тела определяются непосредственно из условия постоянства объема (например, двухмерная осадка полосы, прессование);

ко второй категории относятся многочисленные кинематические задачи, когда размеры тела определяются на каждом этапе деформирования путем построения полей линий скольжения. Примером задачи этой категории может служить процесс осадки с истечением металла в щелевые отверстия;

к третьей категории относятся наиболее сложные кинематические задачи, в которых величина перемещения инструмента на рассматриваемом этапе деформирования не определяет непосредственным образом величину перемещения жестких

зон. В этих случаях требуется совместное решение уравнений пластического течения и равновесия.

Методики расчетов напряженно-деформированного состояния при обработке металлов давлением с применением ЭВМ

Современные вычислительные алгоритмы должны предоставлять возможность как можно более точного описания областей со сложной геометрией. Это возможно с использованием неортогональных и неструктурированных сеток. Реализация алгоритмов математических моделей процессов обработки металлов давлением, основанных на теории пластичности, приводит к построению систем линейных алгебраических уравнений последующему решению этих систем на ЭВМ.

При этом организуется следующий итерационный процесс – связанная задача о неизотермическом движении сплошной среды расщепляется на две задачи: о движении среды при заданном температурном поле в движущейся заданным образом сплошной среде. В первом случае систему уравнений строят с применением начала виртуальных скоростей (метод Галеркина), а во втором – с применением метода конечных элементов. Движение и деформация сплошной среды задаются соотношениями, связывающими начальные и текущие координаты материальных частиц. Описание конечных деформаций, характерных для процессов обработки металлов давлением, с применением нелинейных тензоров, связано с большими математическими трудностями. К наиболее перспективным методам решения краевых задач пластического течения следует отнести конечноразностные и вариационно-сеточные методы.

Их отличают универсальность, быстрая сходимость и устойчивость, наличие развитого математического обеспечения, ориентированного на современные компьютеры. Применение метода конечных разностей рассмотрено на основе модели термического состояния валка, способной определять термические условия при непрерывной и реверсивной прокатке полос с учётом параметров прокатки и всех видов охлаждения. Она требует меньше компьютерного счёта, чем модели, основанные на методе конечных элементов. Каждое физическое явление рассчитывается по своей программе, что облегчает ввод новых опытных данных.

Метод конечных разностей (МКР) базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т.д.). Это позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит существенно упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам метода следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но довольно существенно для уравнений гидродинамики. Кроме того, метод плохо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки.

Методы конечных элементов (МКЭ) и конечных объемов (МКО) базируются на уравнениях тепломассопереноса в интегральном виде. Область, в которой решаются уравнения, разбивается на элементы, внутри которых строятся аппрокси-

манты функций на основе системы базисных функций, определенных на элементе. «Проецируя» интегральные уравнения на эти базисы, получают систему разностных уравнений. Система значительно сложнее принятой в МКР, ее решение требует больших ресурсов памяти и немалого времени.

Одно из главных достоинств метода конечных элементов – хорошая аппроксимация границы, а основные недостатки – необходимость в добротном генераторе конечных элементов, сложность уравнений и невозможность факторизации. Применение этих методов в сочетании с локальными (для отдельных конечных элементов) и глобальными (для области в целом) отображениями с переходом к таким каноническим областям, как прямоугольник, прямоугольный параллелепипед, позволяет, создать универсальные алгоритмы для решения широкого класса прикладных задач.

Метод конечных объемов (МКО) в определенном смысле является развитием разностных методов, хотя иногда рассматривается как некоторая промежуточная стадия между методом конечных разностей (МКР) и методом конечных элементов (МКЭ).

Это вероятно не совсем справедливо, т.к. хотя МКО и учитывает произвольно ориентированные границы внутри разностной ячейки, но в основе своей предполагает ортогональную разностную разбивку (дискретизацию) на прямоугольные параллелепипеды и обладает рядом других особенностей присущих разностным методам.

Во всяком случае, МКО пока не получил при моделировании литейных процессов широкого распространения. (Кроме, пожалуй, задачи заполнения, где применение МКЭ затруднено,

а МКР не дает необходимого соответствия по геометрии заполняемой полости).

Неширокое распространение МКО вероятно связано именно с «промежуточным» характером метода - в тех случаях, когда необходимы произвольно ориентированные границы, лучше использовать собственно МКЭ, а когда допустимо представление геометрии в виде набора параллелепипедов, то проще решать задачу классическим МКР.

Вариационный метод основан на энергетическом принципе. Позволяет определить не только полное и удельное усилия, но и распределение напряжений и деформаций по объёму тела, а также форму тела после деформации с учётом неравномерности деформации. Сумма работ всех внешних и внутренних сил на возможных перемещениях около состояния равновесия равна нулю. При жёстко-вязкопластическом анализе использован вариационный метод множителя Лагранжа и стандартные процедуры метода конечных элементов с итерационной процедурой Ньютона-Рапсона с учётом трения по Ли и Кобаяши. Он учитывает температурные градиенты и влияние скорости деформации. Также приведены результаты теоретического и экспериментального определения силовых параметров, контактных давлений, температур, деформаций, скоростей деформаций.

Наиболее перспективным методом, решающим указанную проблему, в настоящее время следует считать **проекционно-**сеточный метод (метод конечных элементов).

В своей методологической основе этот метод тесно связан с такими проекционными методами, как метод Галеркина или метод Ритца, однако вместо привычных нам координатных функций (тригонометрические функции, полиномы Лежандра, Эрмита и т.д.) в этом методе в качестве координатных используются функции с конечным носителем, отличные от нуля только в сравнительно небольшой области изменения аргументов.

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики.

МКЭ позволяет решать такие задачи, как:

- моделирование течения металла внутри оснастки (при экструзии) или между матрицей и пуансоном (при штамповке) и т.п.

- позволяет установить распределение деформаций и температур по сечению.

МКЭ в настоящее время широко применяется в следующем программном обеспечении (см. таблицу №1).

Таблица №1

Программа	Разработчик
Qform	«КванторФорм»
Deform	Scientific Forming Technologies Corporation
NAGFORM и NAGSIM	Metal Forming Systems, Inc
AutoForm	AutoForm
Ansys	ANSYS, Inc
LS-Dyna	Livermore Software Technology Corpo-

	ration (LSTC)
Forge	Transvalor
SuperForge/Simufact Forming	Superforge

Суть МКЭ состоит в следующем. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В современных САПР ТП ОМД при трехмерной постановке задачи генерируется два вида сеток - *поверхностная* и, на ее основе, *объемная*.

В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны.

Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов.

Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ.

Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разрежённый вид, что существенно упрощает её решение.

Если говорить в матричных терминах, то собираются так называемые матрицы жёсткости (или матрица Дирихле) и масс. Далее на эти матрицы накладываются граничные условия (например, при условиях Неймана в матрицах не меняется ничего, а при условиях Дирихле из матриц вычёркиваются строки и столбцы, соответствующие граничным узлам, так как в силу краевых условий значение соответствующих компонент решения известно). Затем собирается система линейных уравнений и решается одним из известных методов.

При этом под условиями Неймана понимают вторую краевую задачу — в дифференциальных уравнениях краевая задача с заданными граничными условиями для производной искомой функции на границе области — так называемые граничные условия второго рода. По типу области задачи Неймана можно разделить на два типа: внутренние и внешние.

А условия Дирихле представляют собой вид задач, появляющийся при решении дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка.

С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти, для численного анализа системы позволяет рассматривать его как одну из конкретных ветвей диакоптики — общего метода исследования систем путём их расчленения.

Математическое моделирование объёмных пластических течений связано с большими математическими трудностями. Основная проблема - это размерность задачи. Так, при использовании метода конечных элементов решение трёхмерных задач приводит к системам со многими сотнями или тысячами неизвестных. Решение таких систем возможно лишь на больших компьютерах, с высоким быстродействием и оперативной памятью.

С помощью трёхмерного метода конечных элементов определяли упругие деформации валка в процессе прокатки и пластической деформации прокатываемой полосы без учёта изменения температуры и теплопередачи. Показано влияние деформации валка на конечную форму сечения полосы. Контактные напряжения определяли итеративным методом. Напряжение текучести считали функцией деформации и скорости деформации.

Так же разработана трёхмерная модель упругой деформации рабочей клети многовалкового стана, необходимая для предсказания формы и плоскостности прокатываемых полос. Модель применима к промышленным листопрокатным станам с двумя, четырьмя и шестью валками, которые могут иметь профилировку, противоизгиб и осевой сдвиг. Учитывается объёмный характер эпюр контактного давления. Результаты, получение с помощью полуаналитической модели и метода конечных элементов хорошо согласуются между собой даже при относительно коротких валках (малое L/D). Учитывается влияние формы зоны перехода от бочки валка к шейке.

Метод объёмных жёстко-пластических конечных элементов использовали для анализа процессов прокатки круглых профилей, балок, рельс, проволоки и др.. Аналитическую систему можно адаптировать к любым поперечным сечениям, форме калибра и расположению валков. Её применяли для случая прокатки полых блюмов, уголков и двутавров.

Она позволяет совершенствовать как новые виды прокатки, так и традиционные процессы. Решена трёхмерная задача вязко-пластического течения при прокатке листа из заготовки с заданным профилем поперечного сечения. Проанализированы кинетика неустановившегося процесса и формирование поперечных кромок.

Существует метод расчёта формоизменения при сортовой прокатке, где используется систематика метода конечных элементов с разбиением всего объёма металла на конечное число объёмных элементов, но математические операции каждый раз проводятся над относительно большой частью всего объёма с адаптацией её границ как к элементам всего объёма, так и к элементам соседних последовательно выделяемых для обсчёта "больших объёмов".

Модифицируется вектор скорости во всех узловых точках. По сравнению с обычным методом здесь увеличено время расчёта, но уменьшается объём памяти (необходимый). Рассчитанные этим и обычным способом значения усилия и момента прокатки, гидростатических напряжений, эквивалентных скоростей деформации и формоизменения совпадают.

2.4. Физическое моделирование с применением пластометов.

Испытания проводят на специальных образцах и в особых условиях деформирования (температура, степень деформации, скорость деформации, скорости охлаждения и нагрева). Схемы испытаний различные: сжатие, растяжение, кручение.

Результатом таких испытаний и будет серия кривых «напряжение-деформация» при различных скоростях и температурах деформации:



Рис. 11. Кривые «напряжение-деформация»]

Полученные кривые можно загрузить в программу, работающую по алгоритму МКЭ.

Получение таких кривых далеко не единственная цель. Обычно после получения кривых проводят другую серию таких же испытаний. Отличие новой серии в том, что процесс прерывают по достижении определенной степени деформации, затем образцы закаляют, чтобы зафиксировать полученную микроструктуру. Это, естественно, делают на разных образцах вот таким образом:



Рис. 12. Проведение эксперимента для изучения эволюции микроструктуры

То есть при испытании каждого нового образца процессу позволяют идти чуть дальше, чем в предыдущем. Далее изучают микроструктуру образцов на каждом этапе деформации. Таким образом, перед глазами исследователя открывается картина эволюции микроструктуры по ходу деформации:



Деформация

Рис. 13. Эволюция микроструктуры

После обработки результатов всех опытов строят модели, которые позволяют предсказывать:

микроструктуру конкретной стали или сплава при различных условиях деформации;

ход самой кривой «напряжение-деформация» при любых сочетаниях параметров деформирования.

Это очень полезно, т.к. можно провести всего несколько опытов, а потом на их основе получить одно уравнение, которое описывает широкий диапазон изменения параметров.

Конечно, все это очень кратко, и тема эта, как и все остальные, заслуживают полноценной статьи (и книги).

2.5. Физическое моделирование с применением теорем подобия.

Основное положение, на котором основывается применение данного метода, состоит в том, что процессы в природе протекают одинаково в подобных системах независимо от их размера. Всего таких положения три, и называются они теоремы подобия.

Испытания проводят на миниобразцах исследуемого материала с геометрически подобными размерами. Например, при моделировании прокатки, если размеры сляба составляют 2,5×1,5×0,25 м (2500×15000х250 мм), то уменьшенная копия будет бруском 250×150х 25 мм.

Как и везде, здесь есть свои нюансы. Самый простой и легко бросающийся в глаза — маленький брусок остынет быстрее, чем большой. Более подробно о методе и его применении можно узнать из работы.

Часто такие эксперименты осуществляются с привлечением планирования эксперимента, одной из целей которого является уменьшение числа опытов без существенной потери информативности. А вот при обработке результатов такого планируемого эксперимента прибегают к статистическим методам. Так что данный вид моделирования тесно связан со следующим.

2.6. Статистические модели

Статистические модели можно разделить на две группы: модели, которые получены из **запланированного** или **активного** эксперимента.

То есть проводящий эксперимент сам влияет на параметры. На выходе исследователь получает формулы, например, зависимости временного сопротивления от параметров обработки металлов давлением.

Модели, основанные на обработке большого массива данных, например, производственных.

Здесь «модельер» имеет в своем распоряжении кучу цифр и ему остается должным образом обработать этот массив и получить зависимости, например, установить влияние параметров прокатки на механические свойства.

2.7. Моделирование с помощью нейросетей.

С ним я не очень знаком, так что могу ограничиться лишь общими фразами, но поскольку блог создан для структурирования информации, то упомянуть о методе нужно. Кто захочет, тот найдет.

Модели с использованием нейросетей — такие модели, которые построены по принципу нервной системы живых существ и представляют собой сеть соединённых и взаимодействующих между собой простых элементов (нейронов). Структура у них такая:



Рис.14. Структура модели на основе нейросети

Всё так же: имеем несколько входных параметров и в результате сложной цепи обработок получаем значение.

Напоследок хочу сказать, что теме моделирования в России посвящен целый журнал «Моделирование и развитие процессов ОМД», который издается Магнитогорским государственным техническим университетом.

Вопросы для самоподготовки:

1. Опишите общие задачи проектирования технологических процессов обработки металлов давлением?

2. Приведите характеристику современных методов решения задач проектирования технологических процессов обработки металлов давлением? 3. В виде чего задаются граничные условия при моделировании технологических операций обработки металлов давлением?

4. Приведите основные характеристики плоского напряженно-деформированного состояния?

5. Чем характеризуется осесимметричное напряженнодеформированное состояние?

6. Какие особенности решения задач проектирования технологических процессов обработки металлов давлением?

7. Перечислите характерные особенности современных методов расчета, применяемых в САПР ТП?

8. Охарактеризуйте особенности статистических моделей?

9. В чем заключается особенности моделирования с помощью нейросетей?

ГЛАВА 3 МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕ-ТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

3.1 Плоское напряженно-деформированное состояние

Как известно, под влиянием внешних сил в деформируемом теле возникают внутренние силы сопротивления и в самом общем случае напряженное состояние в какой-либо точке деформируемого тела характеризуется тремя главными нормальными напряжениями и направлениями главных осей.

Существует девять видов напряженного состояния: четыре объемных (трехосных), три плоских (двухосных) и два линейных (одноосных).

До недавнего времени анализ довольно большого количество практических задач допускало значительное упрощение математической стороны решения вопроса о деформациях и напряжениях в поковке. Так, во многих случаях с достаточной точностью можно считать, что в плоскостях, параллельных какой-либо плоскости координат, происходят одинаковые процессы деформации.

В качестве примера таких процессов можно привести различного рода деформации листового материала. В подобных задачах весь процесс можно рассматривать как бы в одной плоскости, например, плоскости хоу, для которой z = 0; процессы, происходящие в параллельных плоскостях, можно считать одинаковыми.

Один из эффективных методов реализации общего алгоритма при исследовании плоских и с небольшими отличиями осесимметричных пластических течений сводится к следующему (рис. 15).



Рис. 15. Постановка плоских и осесимметричных задач

Двумерные задачи встречаются в математическом моделировании различных процессов формоизменения. Все эти процессы можно разбить на две группы.

К процессам первой группы применима теория оболочек. Неизвестные параметры в этом случае: изменения главной кривизны в меридиальном и широтном направлениях и (или) относительные удлинения срединной поверхности заготовки – которых совпадают со срединной поверхностью.

Как известно, теория оболочек лежит в основе математического моделирования и расчета большой группы процессов прежде всего листовой штамповки: вытяжки, гибки, рельефной формовки, отбортовки, а также обжима и раздачи в штампах. Предполагается, что к этим процессам могут быть применимы следующие положения и допущения:

 толщина материала во много раз меньше радиусов кривизны, приобретаемой заготовкой;

 материальные точки, расположенные на нормали к срединной поверхности заготовки, сохраняют этот признак в процессе штамповки;

 нормальные напряжения, перпендикулярные к срединной поверхности заготовки, настолько малы, что ими можно пренебречь в уравнениях связи и условии пластичности.

Расчетные схемы процессов штамповки, основанные на теории оболочек, могут быть двух видов. В схемах первого вида формоизменение заготовки полностью определяется формой инструмента.

Расчетные схемы второго вида основаны на моментной теории оболочек. В результате расчета необходимо определить форму участка заготовки, деформирующегося без контакта с инструментом.

Вторая группа включает осесимметричные (вытяжка) или плоские (гибка) процессы формообразования деталей с малыми штамповочными радиусами. В этом случае для математического описания изгиба и спрямления заготовки, огибающей скругленную кромку инструмента, требуется отказаться от гипотезы сохранения нормали.

В противном случае расчетные значения деформаций и напряжений скачкообразно изменяются в местах изгиба и спрямления заготовки, причем значение скача не сообразуется с действительными изменением напряженно-деформированного состояния.

Вначале строится глобальное конформное отображение области течения – криволинейной полосы D на прямолинейную полосу E в плоскости комплексного потенциала $\omega = \phi + i\psi$.

Тем самым в физической области вводится удобная криволинейная система координат ϕ, ψ .

В качестве опорного поля скоростей принимается безвихревое поле, порожденное конформным отображением. Уравнение теплопроводности также преобразуется к новым переменным.

В результате весь комплекс программ математической модели разрабатывается для стандартной области - прямоугольника Е1 плоскости w. Это позволяет унифицировать программы, использовать программы, использовать конечно-разностные методы, работать с двумерными сплайнами.

Уточнение поля скоростей производится с применением поправочной функции тока, удовлетворяющей однородным граничным условиям. Применение метода Галеркина и линеаризация задачи с «расщеплением» ее на две: о движении сплошной среды при заданном температурном поле и о распределении температуры в область с заданным движением о распределении температуры в область с заданным движением сплошной среды приводят к быстро сходящемуся итерационному процессу.

Наиболее эффективным численным методом решения двумерных задач пластичности считают метод конечных элементов (МКЭ). Для совместимости линейных соотношений МКЭ с нелинейными уравнениями пластичности последние преобразуют к кусочно-линейному виду. Если элементы криволинейные, то используются локальное отображение каждого элемента на прямоугольник.

И, наконец, возможно рациональное совмещение метода конформных отображений с методом конечных элементов, поз-

воляющее использовать преимущества каждого из этих методов. Так, само конформное отображение удобно строить с применением метода конечных элементов; расчет температурного поля – с применением дискретизации прямоугольника E1 и т.д.

Далее рассмотрим особенности постановки задач для плоского и осесимметричного течений. Плоское течение сплошной среды характеризуется тем, что все линии тока параллельны фиксированной плоскости и все скорости в соответствующих (т.е. лежащих на одной нормали к указанной плоскости) точках имеют одинаковую величину и направление. В самом общем случае рассматриваемые плоские задачи бывают двух типов – плоское деформированное состояние и плоское напряженное состояние.

Вообще же плоское течение сплошной среды характеризуется тем, что все линии тока параллельны фиксированной плоскости и все скорости в соответствующих точках имеют одинаковую величину и направление.

Движение сплошной среды в связи с этим рассматривают в одной из параллельных плоскостей, которую называют плоскостью течения или физической плоскостью.

Каждая линия, проведенная в выбранной плоскости, на самом деле является направляющей цилиндрической поверхностью с образующими, перпендикулярными к плоскости. Контур обтекаемого тела представляется некоторой линией в плоскости, хотя на самом деле происходит обтекание бесконечного цилиндрического тела.

Все величины сил, приложенных к обтекаемым телам, потокам сплошной среды, и т.д. относят к единице длины в направлении перпендикуляра к выбранной плоскости. Диффе-

ренциальные условия равновесия для плоского деформированного состояния будут иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma_{x}}{\partial_{x}} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial_{y}} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{y}}{\partial_{y}} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial_{x}} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{z}}{\partial z} = 0$$

$$(3.1)$$

В случае плоского деформированного состояния

$$\sigma = 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \tag{3.2}$$

среднее нормальное напряжение будет определяться следующим образом

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$
(3.3)

3.2 Осесимметричное напряженно-деформированное состояние

Одним из частных случаев напряженного состояния, весьма часто встречающихся при обработке металлов давлением, является осесимметричное напряженное состояние, под которым понимают состояние тела вращения, к поверхности или части поверхности которого приложены распределенные нагрузки, расположенные симметрично относительно его оси и одинаковые во всех меридиональных сечениях. Определяющие отношения напряжений и деформаций рассматривают при следующей постановке задачи. Пусть дана некоторая область, образованная вращением криволинейной полосы вокруг оси х1 (рис. 16).



Рис. 16. Постановка осесимметричной задачи

При рассмотрении осесимметричного напряженного состояния удобно пользоваться взамен декартовых цилиндрическими координатами, в которых положение любой точки А определяется радиусом-вектором, полярным углом, отсчитываемым от выбранной оси и аппликатой z.

Тензор напряжений в цилиндрических координатах запишется следующим образом

$$T_{0} = \begin{bmatrix} \sigma_{\rho} & \tau_{\rho\theta} & \tau_{\rhoz} \\ \tau_{\theta\rho} & \sigma_{\theta} & \tau_{\thetaz} \\ \tau_{z\rho} & \tau_{z\theta} & \sigma_{z} \end{bmatrix}$$
(3.4)

При решении некоторых осесимметричных задач кроме цилиндрических, могут встретиться так же сферические координаты. В этой системе положение точки будет определяться радиусом-вектором и двумя углами, определяющими его положение в пространстве. При осесимметричном напряженном состоянии компоненты напряжений не зависят от координаты и, следовательно, все производные по этой координате в дифференциальных уравнениях равновесия обратятся в нуль.

Кроме того, в меридиональных плоскостях (плоскостях, проходящих через ось z) не может возникнуть касательных напряжений вследствие симметричности тела и симметрии внешней нагрузки, и, таким образом, компоненты напряжений при осесимметричном напряженном состоянии можно записать следующим образом

$$\begin{array}{cccc} \sigma_{\rho} & 0 & \tau_{\rho Z} \\ 0 & \sigma_{\theta} & 0 \\ \tau_{Z\rho} & 0 & \sigma_{Z} \end{array} \right\}$$

$$(3.5)$$

3.3 Объемное напряженно-деформированное состояние

Математическое моделирование объемных пластических течений связано с большими математическими трудностями. Основная проблема – это размерность задачи. Так, при использовании метода конечных элементов решение трехмерных задач приводит к системам с многими сотнями или тысячами неизвестных. Вместе с тем хорошо организованный вычислительный процесс позволяет обойтись более доступными ресурсами. Подход к решению краевых задач, основанный на концепции опорного решения и его последующего уточнения, дает возможность ограничиваться сравнительно простыми конструкциями уточняющих функций.

Другими словами, для уточнения «хорошего» начального приближения требуется сравнительно небольшое число членов ряда или конечных элементов. Во многих случаях при решении объемных задач рациональным оказывается применение имитационной модели. Содержащиеся в расчетных формулах эмпирические коэффициенты определяются в процессе проведения «обучающих» экспериментов, а затем апробируются на другой серии «проверочных» экспериментов.

При разработке модели объемного неизотермического течения сплошной среды используют алгоритм, состоящий из следующих этапов:

составление алгоритмов отображения на каноническую область;

алгоритмы разбиения твердотельных объектов сеткой конечных элементов;

построение опорного поля скоростей;

составление уравнений теплопроводности и анализ температурного поля;

уточнение опорного решения. Производится методом конечных решений. В качестве последних используют прямоугольные параллелепипеды сирендипова семейства. В рассматриваемой области им будут соответствовать криволинейные элементы.

В качестве узловых параметров принимают три компоненты поправочного вектора скорости $\stackrel{\rightarrow}{v}$ и гидростатические дав-

ления р. Целью этапа является определение распределения напряжений. Решение задачи распределения напряжений выполняют исходят из уравнений равновесия и одного из условий пластичности;.

зная распределение напряжений по поверхности поковки и имея опытные данные о механических свойствах различных металлов при температурах ковки и штамповки, определяют величину деформирующего усилия.

3.4 Законы сохранения

Любые расчеты технологических процессов на ЭВМ основаны на законах сохранения, под которыми понимаются физические закономерности, согласно которым численные значения некоторых физических величин не изменяются со временем в любых физических процессах.

Если система не является изолированной, то законы сохранения записываются в виде уравнений баланса, связывающих скорость изменения «полного количества» соответствующей физической величины в некотором объеме с «потоком» этой величины через поверхность, ограничивающую объем и «источниками», действующими внутри объема.

Законам сохранения, записанным в интегральной форме соответствуют локальные законы сохранения – уравнения, тождественно выполняющиеся в каждой точки области, заполненной сплошной средой.

К основным физическим законам сохранения относятся:

1) сохранение массы;

2) сохранения количества движения;

3) сохранения момента количества движения;

4) сохранения механической энергии.

Если система не является изолированной, то законы сохранения записываются в виде уравнений баланса, связывающих скорость изменения «полного количества» соответствующей физической величины в некотором объеме с «потоком» этой величины через поверхность, ограничивающую объем и «источниками», действующими внутри объема.

Законам сохранения, записанным в интегральной форме для произвольного объема сплошной среды, соответствуют локальные законы сохранения – уравнения, тождественно выполняющиеся в каждой точке области, заполненной сплошной средой.

3.5 Зависимости механики континуума в матричном представлении

Реализация алгоритмов математических моделей процессов обработки металлов давлением приводит к построению систем линейных алгебраических уравнений и последующему решению этих систем на ЭВМ на основе координат узлов построенной сетки конечных элементов (КЭ).

При этом, перед исследовании процессов, протекающих в сплошной среде, необходимо выбрать систему координат, относительно которой будут определяться характеристики узлов сетки КЭ.

Дальнейшее исследование рассматриваемых процессов может идти по двум возможным подходам: исследование на основе переменных и методов Лагранжа и Эйлера, на которых ос-

нованы метод конечных элементов и метод конечных объемов соответственно.

В первом подходе объектом изучения являются сами узлы сетки КЭ, при этом рассматривают во времени изменение некоторых скалярных или векторных величин, таких как плотность, температура, скорость, а также изменение этих величин при переходе от одной частицы к другой.

В качестве таких координат обычно принимают декартовы координаты Xi произвольного узла в начальный момент времени t = 0, тогда ее текущие координаты xi в том же базисе неподвижного пространства наблюдателя есть функции времени t и начальных координат той же частицы:

$$\begin{array}{l} x_{1} = \varphi_{1} \left(X_{1}, X_{2}, X_{3}, t \right) \\ x_{2} = \varphi_{2} \left(X_{1}, X_{2}, X_{3}, t \right) \\ x_{3} = \varphi_{3} \left(X_{1}, X_{2}, X_{3}, t \right) \end{array}$$

$$(3.6)$$

Переменные X1, X2, X3 и время t называются переменными Лагранжа.

Зависимости (3.1) полностью определяют положение частицы в пространстве ее лагранжевыми координатами X1, X2, X3. Это позволяет ввести еще одну систему координат – подвижную деформируемую систему координат X1, X2, X3, которая называется соответствующей системой.

Второй подход, развитый Эйлером, в качестве объекта изучения принимает неподвижное пространство наблюдателя (или его фиксированную часть), заполненную движущейся средой. Различные величины, характеризующие движение, считаются функциями узла и времени, т.е. функциями трех аргументов xi и времени t, называемых переменными Эйлера.

С точки зрения Эйлера, объектом изучения являются различные поля (скалярные, векторные или тензорные), характеризующие движение сплошной среды.

Наибольшее распространение в настоящее время получил метод конечных элементов, который можно трактовать как метод аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, представляющей собой множество значений заданной функции в некотором конечном числе точек области ее определения в совокупности с кусочными аппроксимациями этой функции на некотором конечном числе подобластей.

К основным этапам решения задачи на ЭВМ можно отнести следующее:

1) ввод геометрии и условий процесса;

2) дискретизация области;

3) генерирование начальных значений полей скоростей на первом шаге;

4) локальная аппроксимация на отдельном элементе;

5) глобальная аппроксимация кусочно-полиномиальной функцией, определенной на всей области;

6) составление системы линейных алгебраических уравнений с применением метода Ритца или Галеркина;

7) решение полученной системы относительно узловых значений;

8) вычисление погрешности;

9) вычисление искомых величин в элементе;

10) преобразование геометрии.

Решение рассматриваемых задач происходит в следующем порядке:

процесс дискретизации области сводится к двум этапам: разбиение рассматриваемой области на линейные и треугольные элементы и нумерация элементов и узлов;

построение интерполяционного полинома для отдельного элемента;

построение интерполяционного полинома для дискретизированной области;

построение матрицы жесткости.

Результирующая система уравнений имеет следующий вид

$$[K]{\Phi} = {F}, \qquad (3.7)$$

где [К] – матрица жесткости;

{Ф} – матрица жесткости элемента;

{F}- глобальная матрица жесткости.

Таким образом, при использовании метода конечных элементов получается система уравнений, которая должна быть решена относительно неизвестных узловых параметров, к которым главным образом относятся деформации и напряжения.

Одним из наиболее эффективных методов решения системы уравнений является метод исключения Гаусса, для использования которого матрица системы преобразуется к треугольному виду, после чего решение получается обратной прогонкой.

Процесс деформирования заготовки рассчитывают поэтапно. Расчет каждого этапа содержит вычисление перемещений узлов и приращений неизвестных внешних сил. По найденным перемещениям подсчитывают приращения деформаций и напряжений элементов.

3.6 Деформации

Определение деформаций тела для исследования в постановке метода конечных элементов выполняют по методу Лагранжа. Вначале решения глобальную задачу подразделяют на более мелкие подзадачи, которые имеют более легкую формулировку, после чего они должны тщательно объединиться и затем решаться совместно.

При разбиении процесса решения задачи на более простые используется метод, который называется дискретизацией.

На рис. 17 показано осесимметричное тело, деформирующееся между плоскими инструментами.



Рис. 17. Постановка задачи

Справа на рис. 18 показана решетка, наложенная на фигуру заготовки. Эта решетка является сеткой, представляющей тело перед деформированием.

Каждый прямоугольник соответствует части материала рассматриваемого объема тела.

Под действием скоростей, прикладываемых к узлам сетки (которые определяют их координаты) будут изменяться. Изменение координат узлов сетки КЭ, вычисляется исходя из следующей постановки задачи



Рис. 18. Преобразование начальных координат после выполнения вычислений

Изменение координат узлов сетки КЭ определяют деформации, которые вычисляются с учетом действия следующих сил и факторов (рис. 19).



Рис. 19. Определение деформаций при сжатии

Или, другими словами

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta h}{h_0} \tag{3.8}$$

В процессе деформации в общем случае элементарная сфера превращается в эллипсоид, известный как материальный эллипсоид деформации с полуосями dhf, dr0, dr1 (рис. 20).


Рис. 20. Логарифмические деформации

Деформации материального эллипсоида определяются вычислением логарифма

$$\varepsilon_T = \ln\left(\frac{h_f}{h_0}\right), \quad \varepsilon_0 = \ln\left(\frac{dr_0}{dr}\right), \quad \varepsilon_1 = \ln\left(\frac{dr_1}{dr}\right)$$
(3.9)

Суммарная деформация тела в рассматриваемом случае будет определяться тензором логарифмических деформаций вида

$$T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix}, \qquad (3.10)$$

главные оси которого совпадают с осями материального эллипсоида, а главные компоненты называются главными логарифмическими деформациями.

Мгновенную деформацию изучаемой области характеризует степень деформации. Эта величина определяет степень изменения напряжений в некотором узле сетки КЭ во времени.

Деформации узлов сетки КЭ определяются при выполнении условия постоянства объема с учетом условия несжимаемости (3.11) и вычисления величины средней деформации, которая определяет фактическую степень деформации.

$$\varepsilon_T + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0 \tag{3.11}$$

Вычисление значения величины средней деформации или компенсации объема должно начинаться перед началом моделирования:

$$\overline{\varepsilon}_{avg} = \frac{V}{h}, \qquad (3.12)$$

где V – начальная скорость главного инструмента, мм/с;

h – максимальная высота заготовки, мм.

В однородной деформации главные логарифмические деформации представляют собой результат суммирования бесконечно малых деформаций, поэтому их часто называют истинными деформациями.

Знание основных положений теории напряжений текучести принимает особое значение во время решения задач проектирования технологических процессов ОМД при достижении порога пластичности.

При деформировании материала возникающие напряжения нуждаются в увеличении значений действующей деформации, как показано на рис. 21. Напряжения текучести постепенно сильно снижаются на некоторой области изменения переменных величин, при накоплении напряжений. Как показано на рис. 8, напряжения текучести интенсивно изменяются вместе с этими переменными величинами.



Рис. 22.

Структура применяемого материала определяет действующие напряжения в поковке, по характеру которых материалы могут классифицироваться следующим образом (рис. 23).



(у_s) Напряжения текучести

Рис. 23.

В большинстве случаев упругими деформациями можно пренебречь, так как большая часть металла характеризуется действием напряжений, которые подчиняются основному правилу закона Леви-Мизеса, в основе которого лежит понятие о тензоре напряжений

$$\sigma_{y} = \frac{1}{\lambda} \varepsilon_{y}^{-}$$
(3.13)

Напомним, что тензором напряжений называют симметричный тензор, определяемый исходя из следующих соображений (см. рис. 24)



Рис. 24.

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix},$$
(15.2)

где диагональные элементы называются нормальными напряжениями. Боковые элементы называются касательными напряжениями.

Для корректной оценки действующих во время деформации металла напряжений необходимо учитывать влияние ползучести материала, которая медленно продолжается с увеличением времени контакта. Напряжения определяются только в функции от температуры и времени, что предопределяет сложность решения поставленной задачи. Существует три различных теории учета ползучести: основная, вторичная (статистическая) и третичная (см. рис. 11).

Напряжения и деформации в этом случае будут связаны следующим отношением

$$\varepsilon = B\sigma^n, \qquad (3.14)$$

где

□ – степень напряжений;

В, n – константы, определяющие свойства материала;

□ – напряжения.



Рис. 25.

Кроме свойств ползучести, на характеристики напряженно-деформированного состояния поковки значительное влияния оказывает трение, действующее на формообразующих поверхностях инструмента.

Рассмотрим три основных различных случая, позволяющие количественно учесть влияния трения между заготовкой и инструментами, определяющими математическую модель процесса течения металла (рис. 26).

В случае рассмотрения напряженно-деформированного состояния без учета трения, не возникает сопротивления для

случая прямого однородного истечения материала. В случае действия высокого трения рост напряжений должен всегда увеличиваться с учетом текущего перемещения главного.

Все характеристики процесса течения металла вычисляются на основе принципа минимума потенциальной энергии: распределение скоростей прогнозируется при низких значениях работы с целью достижения лучшей аппроксимации реального распределения скоростей.



Начальная геометрия



Без трения







Высокое трение

Рис. 26.

Принцип минимума потенциальной энергии математически можно описать следующим образом

$$\pi = \int_{V} \overline{\sigma} \, \varepsilon \, dV - \int_{S} F_{i} u_{i} dS \tag{3.15}$$

$$\delta \pi = \int_{V} \overline{\sigma} \delta \varepsilon - \int_{S} F_{i} \delta u_{i} dS + K \int_{V} \varepsilon \delta \varepsilon dV = 0$$
(3.16)

При достижимых степенях существуют решения для комплексной формы, которые обрабатываются с применением специального математического аппарата, такого как, МКЭ с учетом физических законов сохранения.

Выведение связей напряжений и деформаций основано на знании законов сохранения, под которыми понимают физические закономерности, согласно которым численные значения некоторых физических величин не изменяются со временем в любых физических процессах.

Если система не является изолированной, то законы сохранения записываются в виде уравнений баланса, связывающих скорость изменения «полного количества» соответствующей физической величины в некотором объеме с «потоком» этой величины через поверхность, ограничивающую объем и «источниками», действующими внутри объема.

Законам сохранения, записанным в интегральной форме соответствуют локальные законы сохранения – уравнения, тождественно выполняющиеся в каждой точки области, заполненной сплошной средой.

К основным физическим законам сохранения относятся:

1) сохранение массы;

2) сохранения количества движения;

3) сохранения момента количества движения;

4) сохранения механической энергии.

Если система не является изолированной, то законы сохранения записываются в виде уравнений баланса, связывающих скорость изменения «полного количества» соответствующей физической величины в некотором объеме с «потоком» этой величины через поверхность, ограничивающую объем и «источниками», действующими внутри объема.

Законам сохранения, записанным в интегральной форме для произвольного объема сплошной среды, соответствуют локальные законы сохранения – уравнения, тождественно выполняющиеся в каждой точке области, заполненной сплошной средой.

3.7 Течение. Скорости деформации

Термомеханический режим технологических процессов обработки металлов давлением характеризуется температурой, скоростью и степенью деформации.

Совокупное влияние этих факторов определяет сопротивление металла деформированию и условия протекания процессов рекристаллизации, фазовых превращений деформируемого сплава и т.п. Движение и деформации сплошной среды задаются соотношениями, связывающими начальные и текущие координаты материальных частиц.

Описание конечных деформаций характерных для процессов обработки металлов давлением выполняют с помощью анализа поля вектора скорости $\vec{v}(x_i, t)$, которое описывает мгновенную картину течения всей совокупности материальных частиц.

Поскольку поле вектора скорости является частным случаем векторного поля, для его описания используют общую теорию векторных полей.

Векторная линия поля скоростей называется линией тока. Касательная к ней совпадает с направлением вектора скорости в этой области. Совокупность всех векторных линий образует картину течения в данный момент времени. Поле скоростей

может быть стационарным и нестационарным и определяется видом движения.

Узлы сетки КЭ под действием прикладываемых к ним скоростей, смещаются по некоторой траектории. Направление движения узла является касательным к траектории. Зная поле вектора скорости, можно установить связь начальных и текущих координат узлов сетки КЭ и перейти к вычислению деформаций.

3.8. Сопротивление металла деформированию при комнатной и пониженной температурах

Общим свойством всех без исключения металлов и металлических сплавов является их способность упрочняться при деформировании в определенны условиях (деформационное упрочнение).

Эта способность проявляется в том, что прочностные характеристики материала возрастают в то время как характеристики пластичности падают, т.е. с увеличением степени деформации интенсивность упрочнения постепенно ослабевает.

Следовательно, металл, претерпевший большую предшествующую деформацию, можно условно считать идеально пластичным, так как сопротивление металла деформированию не зависит существенно от дальнейшего увеличения степени деформации.

При холодной обработке металлов давлением увеличение скорости в некоторых случаях приводит не к повышению, а к уменьшению усилия в связи с влиянием теплового эффекта деформации.

3.9. Сопротивление металла деформированию при высоких температурах

При большой длительности процесса горячей обработки металлов давлением холодным инструментом имеет место значительная неоднородность температуры, что существенно влияет как на усилие, так и на характер течения металла.

Так, например, известно, что при температуре выше температуры рекристаллизации металла и малой скорости деформации упрочнение практически отсутствует (идеальная пластичность).

Вопросы для самоподготовки:

1. С какой целью в САПР ТП используются законы сохранения?

2. Охарактеризуйте зависимости механики континуума в матричном представлении?

3. В чем заключаются особенности вычисления деформации при моделировании пластического течения в САПР ТП?

4. С помощью какого инструмента анализируется течение металла в штамповочном ручье?

5. Охарактеризуйте инструменты для анализа сопротивления металла деформированию при комнатной и пониженной температурах?

6. В чем заключаются особенности сопротивления течения металла деформированию при высоких температурах?

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ МЕ-ТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В САПР ТП

4.1. Решение задач моделирования технологических процессов обработки металлов давлением в двумерной постановке в программе QForm-2D

Как известно, для задач обработки металлов давлением (ОМД) характерна чрезвычайная сложность физических явлений, протекающих в очаге деформации. Формоизменение металла представляет собой термомеханический процесс, описываемый нелинейной системой уравнений термо-вязкопластичности, которая не поддается аналитическому решению.

Привлечение вариационных и разностных методов позволило значительно продвинуться в усложнении постановки задачи, и, соответственно, достичь более глубокого уровня понимания явлений, протекающих в очаге деформаций.

Математическим ядром систем анализа процессов пластической деформации QForm, которая представляет собой продолжение линейки систем ФОРМ2Д, является метод конечных элементов (МКЭ).

В современных программных средствах рассматриваемого класса конечно-элементное ядро дискретной модели, как правило, скрыто от пользователя. В этом случае пользователь не задумывается над такими вопросами, как задание количества элементов, их размеров, ни каких-либо характеристик, привязанных к узлам или элементам.

Программа QForm имеет стандартный интерфейс приложения операционной системы Microsoft Windows. Главное окно программы содержит следующие элементы (рис. 27). Сразу под строкой заголовка программы располагается меню программы, позволяющее получить доступ к любому инструменту программы. В зависимости от версии программы QForm меню программы может меняться, но основными и достаточные для работы средства доступны в любой версии. К этим средствам можно отнести следующие пункты:

1. пункт меню Файл позволяет выполнить как стандартные действия:

2. создать новый файл расчета;

3. открыть существующий файл;

4. сохранить результаты расчета;

5. произвести расчет;

6. выйти из программы QForm,

так и не стандартную операцию – записать контуры инструментов и деформированной заготовки, воспроизводимых в окне результатов;

Технологический процесс штамповки состоит обычно из нескольких операций, которые составляют технологическую цепочку. Меню Операция позволяет:

- добавить операцию в технологическую цепочку;

- удалить операцию из цепочки;

- изменить заголовок операции;

- задать свойства операции;

- сделать операцию активной;



Рис. 27. Интерфейс программы QForm

 пункт меню Вид позволяет настроить управляющие клавиши и подсказку;

- пункт меню Графики служит для выбора режима показа графиков: на системе и в трассируемых точках;

- пункт меню Настройка необходим для задания основных настроечных параметров;

- пункт меню Утилиты позволяет получить доступ к внешним программам: редактор базы данных материалов, редактор базы данных оборудования и редактор геометрических файлов:

пункт меню Справка содержит справочную информацию по подготовке данных на расчет и инструкцию по их просмотру.

4.1.1. Классификация исходных данных

Исходные данные, необходимые для проведения расчета в программе QForm можно классифицировать следующим образом:

геометрия инструмента и заготовки; оборудование; технологические параметры; информация о материале заготовки; параметры смазки.

Геометрия инструментов и заготовки может быть задана при помощи встроенного графического редактора или импортирована из CAD-системы через файлы стандарта DXF.

4.1.2. Методика быстрой подготовки геометрических данных

Основным вопросом при подготовке исходных данных к расчету является выполнение их построения с учетом ограничений и требований, накладываемых программой QForm. Встроенный графический редактор программы обладает довольно слабыми возможностями, которые не позволяют быстро и легко подготовить необходимую информацию, особенно если учесть тот факт, что до знакомства с QDraft конструктор как правило уже работал в полноценной CAD-овской системе.

С этой целью разработчики программы QForm предусмотрели возможность импорта/экспорта файлов различных форматов. Наиболее распространенной в нашей стране из двухмерных CAD-овских систем на сегодняшний день является AutoCAD.

Экспорт данных из этой системы осуществляется в формате Autodesk DXF. Методика подготовки данных в этом случае будет включать в себя следующие шаги:

выполнение геометрических построений в AutoCAD выполняется в масштабе 1:1. Редактор AutoCAD имеет стандартный интерфейс приложения операционной системы Microsoft Windows, основным отличием которой является наличие средств рисования и редактирования рисунков. Ввод команд в AutoCAD осуществляется с помощью панелей инструментов. Панели инструментов могут быть как плавающими, так и закрепленными с фиксированным местоположением. Для рисования и редактирования изображений в AutoCAD используются две основные панели – Рисование и Модификация (Редактирование). Основной командой при подготовке геометрических данных для QForm из панели Рисование является команда Отрезок (рис. 28 а). Чтобы работать с этой командой достаточно знать следующее.

Построение отрезка начинается с указания точки начала в произвольной точке графической области AutoCAD после нажатия на кнопку Отрезок . По умолчанию вслед за следом мыши, представляемом в AutoCAD в виде перекрестья, тянется резиновая нить (рис. 28 б), обозначающая направления рисования отрезка. Как правило, контура инструментов, не беря во внимание непосредственно гравюру, и заготовки состоят из перпендикулярных отрезков. Для того, чтобы начать рисовать строго горизонтальный или вертикальный отрезок, достаточно нажать клавишу F8, которая включает/отключает режим рисования OPTO (рис. 28 в).

Далее, вторую точку отрезка можно получить наиболее простым и эффективным способом задания координат точек, которым является метод указания направления и ввода расстояния. Расстояние задается переводом курсора в необходимое направление и в ответ на запрос в командой строке AutoCAD to point: вводом натуральной величины (что соответствует масштабу 1:1) отрезка в миллиметрах (рис. 2 г).



в) режим ввода второй точки г) выполненное построение
 после нажатия клавиши F8
 отрезка длиной 50 мм

Рис. 28. Методика построения отрезка в AutoCAD

Точное черчение в AutoCAD осуществляется с помощью включения режима объектной привязки. Этот режим предназначен для точной установки курсора в одну из характерных точек объекта. Режим объектной привязки включается/отключается нажатием клавиши F3. Характерные точки, к которым будет привязываться начальная точка построения следующего примитива устанавливаются с помощью команды Установки прыжка объекта из панели инструментов Прыжок объекта. После щелчка левой кнопкой мыши по иконке появиться диалоговое окно Установки черчения (рис. 29), в котором щелчком левой кнопки мыши по соответствующему флажку устанавливается тот или иной режим привязки курсора.

Премии объекто ек и (F3)		🖓 Тречнег прыхвал	doerna exist (FT
Реконы прынка объекта	5	P Briend	Выбар всего
Д № Средние точка	n	P Depression strep	Очистить есе
anell P O	0	Taresustees	
🖾 🖾 Maax	X	P Enstruit	
○ IP Keapert	13	P Revice repetiment	er:
Х № Перасенные	11	🗵 Паралека.	
- IF Pacaspese			
m			
99°			

Рис. 29. Диалоговое окно Установки черчения

Полный перечень режимов объектной привязки приведен в приложении 1.

При рисовании контуров инструментов могут потребоваться три наиболее часто используемые команды из панели инструментов Модификация – переместить Ф, обрезать — и удлинить — Порядок работы с любой из команд из панели инструментов Модификация одинаковый и заключается в следующем:

в начале необходимо выбрать нужный инструмент в текущий момент времени щелчком мыши по его иконке (рис. 30)



Рис. 30. Панель инструментов Модификация

Далее AutoCAD предлагает выполнить выбор объектов для редактирования. Это осуществляется их выделением одним из двух существующих способов: выделение объектов рамкой с верху и выделение объектов рамкой снизу. Разница этих двух способов заключается в том, что в первом случае выделяются только те объекты, координаты которых лежат строго внутри рамки. Во втором случае выделяются все объекты, попавшие в рамку. Рамка вызывается указанием произвольной точки на графической области, далее производится щелчок левой кнопкой мыши и перемещением ее одновременно влево или вправо вниз или влево или вправо вверх. Фиксация границы выделения осуществляется щелчком левой кнопкой мыши, после чего объекты, попавшие в эту область будут отображаться маленькими штришками с синими квадратиками на характерных точках объектов; для выполнения редактирования набора объектов, например, обрезку лишних элементов контура необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши для отмены режима выделения и щелчком левой кнопкой мыши по ненужным элементам объекта производиться их обрезка.

построение геометрических данных выполняется согласно очередности выполнения необходимых технологических переходов. Главным требованием программы QForm является наличие на первом переходе (как правило, это осадка) трех контуров:

инструмента 1 (TOOL1);

заготовки (WPIECE);

инструмента 2 (TOOL2).

На последующих переходах достаточно иметь два контура – TOOL1 и TOOL2. Контур заготовки будет браться из результатов расчета предыдущего перехода и перекладываться автоматически. Для того чтобы программа QForm корректно восприняла построенную геометрию, последняя должна отвечать следующим требованиям:

с целью уменьшения размера задачи, а, следовательно, и времени вычисления, достаточно выполнить построение только одной (правой) половины в случае симметричности детали, не зависимо от типа поковки (осесимметричная или плоская). При этом левая граница двух инструментов и заготовки должна лежать на одной линии;

левая нижняя точка второго инструмента должна начинаться с точки с координатой (0, 0), которая соответствует началу первой четверти в декартовой системе координат. В

противном случае программа QForm выдаст соответствующие предупреждения о некорректности файла с геометрией:

завершающим этапом является экспорт построенных контуров в формат DXF. Для этого, достаточно выполнить следующие действия: зайти в меню AutoCAD Файл, выбрать команду Сохранить как... и выполнить предложенный диалог (рис. 3), выбрав в соответствующем поле значение AutoCAD 2000 dxf;

После сохранения файла в формате dxf работу в AutoCAD можно завершить. далее подготовленные в AutoCAD и сохраненные в формате dxf данные необходимо перевести в собственный графический формат программы QForm – crs. Для этого необходимо воспользоваться графическим редактором программы QForm – QDraft. Как и QForm, QDraft представляет собой самостоятельную внешнюю программу, которая является препроцессором программы QForm и имеет стандартный интерфейс приложения операционной системы Microsoft Windows (рис. 31).

Перевод файлов dxf в crs начинается с выбора из меню Файл команды Импортировать -> Autodesk Data Exchange Format. При этом появиться стандартное диалоговое окно Открыть, в котором следует выбрать файл, содержащий построенную геометрию (рис. 32).

Терить		12
Dankas Line Ocea	renefi por (D.)	- + E) cf E:
C (PRIDCESS C) Program Files C) Offician C) Offician C) Soletwooks C) UN	Hos gos presta Parrie Ctacapta 1MT temposition 14	Moreperystrip 3
lites assess The	aper pretop 2	Qrepare
Den Balance - Taur	ideuk Data érüli ange For	with(G) T Ones

Рис.31. Диалог команды Импортировать



Рис. 32. Основные элементы интерфейса QDraft

После щелчка по кнопке открыть окно QDraft примет вид, показанный на рис. 4. Завершающим этапом подготовки геометрических данных является нумерация инструментов и определение контура заготовки.

На этом этапе достаточно нажать кнопку 1 (рис. 4) и щелчком по кнопке 2 и с помощью появившейся рамки выбрать контур одного из инструментов, после чего, щелкнув правой кнопкой мыши, задать соответствующий ему номер – TOOL1, TOOL2, TOOL3, TOOL4.

Здесь следует учесть, что имя контура формующего инструмента, который создает очаг деформации в заготовке, по умолчанию в программе QForm должен соответствовать имени TOOL1. Для заготовки зарезервировано специальное имя – WPIECE.

После определения имен контуров остается экспортировать данные в формат сгѕ выбором команды из меню Файл -> Экспортировать -> QForm/Form2D Geometric File. После экспорта данных необходимо вернуться в проект QForm. На этом подготовка геометрических данных завершена.

4.1.3. Выполнение расчета

Для запуска на расчет необходимо выполнить диалог специального мастера (рис. 33), в котором необходимо выполнить все предлагаемые им шаги. На этом этапе должны быть определены и точно известны следующие данные:

оборудование;

технологические параметры:

тип задачи – круглая в плане или плоское сечение;

геометрия;

оборудование;

параметры процесса – конечное расстояние между инструментами;

параметры заготовки – материал и температура нагрева;

параметры инструмента – начальное значение температуры и материал смазки, определяющий величину фактора трения.

Выбор этих параметров производится из базы данных, поставляемой вместе с программой QForm.



Рис. 33. Мастер подготовки исходных данных

Закладка "Процесс" (рис. 34). Выбираем вид технологического процесса - деформация в гидравлическом прессе, щелкнув левой кнопкой мыши на соответствующем флажке. После этого станет доступной клавиша "Вперед".



Рис. 34. Закладка "Процесс"

В закладке "Задача" указываем тип формы заготовки -"Круглая в плане" и нажимаем активизировавшуюся кнопку "Вперед" (рис. 35).



Рис. 35. Закладка "Задача"

В закладке "Геометрия" выбираем геометрический файл *.crs из соответствующего каталога (рис. 36) и нажимаем клавишу "Вперед".

В закладке "Оборудование" выбираем из списка базы данных тип оборудования или вводим скорость его инструмента.

В закладке "Параметры процесса" задаем конечное расстояние между инструментами (рис. 37) и нажимаем клавишу "Вперед".

	Facesperior in contrast Bulgare main sour pass on an one Source: la @00000P Assessment Aspena/A	Balance rescale plaquement
R	LASTON SALAND	0
	Ches Contractor	

Рис. 36. Закладка "Геометрия" Рис. 37. Закладка "Параметры процесса"

В закладке "Параметры заготовки" (рис. 38) выбираем материал заготовки - свинец и задаем температуру нагрева заготовки, равную температуре окружающей среды 20-220С.

В закладке "Параметры инструмента" (рис. 39) выбираем материал заготовки - свинец и задаем температуру нагрева заготовки, равную температуре окружающей среды 20-220С.



Рис. 38. Закладка "Параметры заготовки"

Recentpain	ecopeers	Tipalette inctaileare
Territitorr		Proj Bill 2007 Proj Bill 2007

Рис. 39. Закладка "Параметры инструмента"

После задания всех исходных данных откроется клавиша готовности, на которую следует перевести курсор и щелкнуть левой кнопкой мыши.

После того, как будут готовы данные на расчет станет активной панель управления расчетом (рис. 13). Левая кнопка на панели предназначена для выполнения предварительной обработки данных. Кнопка преданализа необходима, если вы используете трассируемые точки. Для начала расчета необходимо нажать кнопку запуска на расчет

Во время моделирования отображаются промежуточные результаты, которые одновременно записываются в файл. Для того, чтобы приостановить моделирование, необходимо нажать на кнопку .

Прерванный расчет может быть продолжен. Для этого достаточно повторно нажать кнопку запуска на расчет, который будет продолжен с последней записи.

4.1.4. Просмотр результатов

Пошаговый просмотр результатов расчета осуществляется с помощью специального мастера, функции которого представлены в виде кнопок магнитофона (рис. 40).

Операция 1						
Просмотр	He	-		-	11	191

Рис. 40. Мастер просмотра результатов

Крайние кнопки перемоток данного мастера позволяют перейти в начало и конец расчета. Кнопки перемоток и и позволяют перейти на шаг назад и вперед соответственно. Кнопка и позволяет проследить процесс формообразования в реальном времени. Кнопка и останавливает показ процесса формообразования на выбранном шаге.

Главной целью проектирования технологических процессов является определение потребных энергосиловых характеристик оборудования, необходимых и достаточных для его выбора.

Основными показателями здесь является работа пластической деформации А, МН/м и номинальное усилие Р, МН в зависимости от текущей величины хода. Текущие значения этих параметров можно наблюдать в специальной области (рис. 41).



Рис. 41. Текущее значение усилия

Значения работы и усилия могут быть представлены в виде графиков в зависимости от текущего значения хода (рис. 9 б). Диалоговое окно, показанное на рис. 42 а) вызывается щелчком правой кнопки мыши по области окна программы QForm, в котором изображен процесс деформирования, и входом в диалог Графики общие. Для выхода из режима просмотра графиков достаточно нажать кнопку Закрыть (рис. 42 б).



Рис. 42. Просмотр графика зависимости усилия от хода

4.2. Методика работы в современном САПР ТП ОМД. Препроцессор системы Deform-3D

Для решения задачи оптимизации или проектирования технологического процесса обработки металлов давлением, связанным с изучением 3-х мерного упруго-пластического напряженно-деформированного состояния металла можно применять специализированное ПО, такое как QForm-3D, Deform-3D и Simufact Forming.

Вначале рассмотрим возможности программного комплекса Deform-3D, постановка задачи с ее последующим решением в системе QForm-3D практически аналогична рассмотренной выше QForm-2D. Для осуществления запуска программы на машине с операционной системой Unix, введите Deform3. На машине с операционной системой Windows нажмите кнопку Start/Пуск и выберите пункт меню Пуск -> Программы -> Deform-3D v. 5.x -> Deform-3D.

Появиться главное окно программы **DEFORM-3D MAIN**, которое показано ниже на рис. 43.

Новую задачу можно создать, выбрав пункт **Файл** -> **Новая проблема** или щелкнув по кнопке *Новая проблема*. Появиться окно PROBLEM SETUP.

Примите параметр открытия новой проблемы по умолчанию, используя препроцессор Deform-3D (и ни один из других мастеров), простым щелчком. Для определения местоположения новой проблемы, щелкните 'Under DEFORM Problem directory '.

В поле Имя задачи (Problem Name), вызовите щелчком прикладной Блок. Откроется препроцессор Deform-3D. Окно

препроцессора разделено на несколько различных частей, а именно:

Окно Экрана Дисплея, Дерево объектов и Данные объектов. В верхней части экрана располагается строка из значков. Эти значки будут описаны подробно, поскольку с ними пользователь будет сталкиваться при выполнении лабораторных работ.



Рис. 43. Главное окно программы Deform-3D

Step 1	Дерево объектов		ulacer officianical i Object 1	5mp-1		
		Tokistipot	7.6	30 (J#26		
		Current Obje	(1) Disjoce 1			
		30	100 (mpar			
			ChanNane	Diane 1	-	
Окно дисплея		Exact;		E Por		
		Yet		C Parts		
		- 11000/11	Const Type	C Ebite		
		Harry		C Dato Plane		
	Объектные	五			Nautara -	
	SPECIAL STREET		Tergentum	fis	1	
		Topaty .	T Piner 0	•		
		1.diarese				
	1					

Рис. 44. Окно пре-процессора

Наиболее важные из значков расположены в верхнем уровне. Из-за их важности, дадим краткое описание каждого:

Таблица №2

Зна- чок	Действие	Описание
*	Управление Моделировани- ем	включает все опции моделирова- ния и определяет критерии оста- новки задачи
	Материал	устанавливает все свойства мате- риалов
٩,	Объект	контролирует все положения объектов
*	Межобъектные Отношения	определяет межобъектные отно- шения
.	Генерация Базы данных	генерирует базу данных, необхо- димую для последующего реше- ния
₽ ₂	Выход	осуществляет выход из пре- процессора и возврат в главное меню (MAIN)

Для открытия окна SIMULATION CONTROL, щелкните на значке . Замените заголовок моделирования. Удостоверьтесь, что Единицы установлены на Английские (English), и что активизирована Деформация (флажок рядом с пунктом).

Когда завершите, щелкните по кнопке

Добавьте объект к проблеме, щелкнув по кнопке Вставки

объекта 🍱 под Деревом объектов.

Дерево. Измените название объектов с Object1 на Block

и щелкните _______ Установите тип пластичности.

Simulation Control			×
Main Step Stop Remesh Criteria Iteration Process Condition Advanced Control File	Name and Number Simulation Title: BLOCK Operation Name: OPERATION 1 Operation Number: 1 = Mesh Number: 1 =	Units SI © English Type Incremental © Steady State Mode Heat Transfer Deformation Transformation Grain Heating Resistance	<u>Q</u> K <u>C</u> ancel

Рис. 45. Окно SIMULATION CONTROL

При использовании Deform, поверхностное определение объектов интерпретируется как геометрия. Для импортирова-

ния геометрию объектов, нажмите Geometry и затем кнопку

Для того чтобы импортировать геометрию в Deform 3D используется самый общий тип файлов – файлы стереолитографии (.STL). Геометрия для объекта **Block** расположена в файле **Block_Billet**.

Теперь, когда геометрия поверхности определена для объекта Block, необходимо сгенерировать сетку конечных элементов для этого объекта. Щелкните по кнопке местрановки параметров контроля сетки. Чтобы увидеть, на что будет похожа поверхностная сетка, при использовании пара-

В случае, если поверхностная сетка создает хорошее впечатление, для завершения ее генерации, щелкните по кнопке Generate Mesh

. Когда генерация сетки завершится, объект будет иметь около 5000 элементов (это число можно увидеть или в Дереве объектов или в Итоговом разделе генерации сетки).

Функции, которые управляют Дисплеем (типа Панорамирования, Изменения масштаба изображения, Увеличения, и Вращения), могут быть активизированы, при использовании значков наверху окна Пре-процессора.

Этим функциям также соответствуют простые нажатия клавиш или их комбинаций на клавиатуре/мыши, что позволяет пользователю быстро исполнять эти функции без частых щелчков.

Как только Вы прочитали об этих функциях, не стесняйтесь использовать их, для управления видами объекта **Block** на **Дисплее**.



Рис. 46. Пример сгенерированной сетки КЭ

таолица №э эначки диспле	Таблица	<u>№</u> 3	Значки	Диспле
--------------------------	---------	------------	--------	--------

Значок	Функции	Описание
		Панорамирование объектов в ОКНЕ ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ мо-
_	Панорамирова	жет быть динамическим, что осу-
لم	ние	ществляется смещением вниз,
	объектов	влево, или вправо, двигая мышь и
		удерживая левую кнопку. (Ярлык:
		Сдвиг + Левая кнопка мыши)
		Приближение/Удаление части
		ОКНА ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ, мо-
		жет выполнено,
		щелчком и удержанием левой
0	Приближение/	кнопкой мыши в одном угле эле-
~	Удаление	мента перемещайте курсор от
		начала окна, затрагивая и изменяя
		масштаб области изображения.
		(Ярлык: Ctrl + Высокий звук +
		Левая кнопка мыши)

Продолжение табл. №3

Значок	Функции	Описание
٩	Приближение/ Удаление	Приближение/Удаление части ОКНА ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ, мо- жет выполнено, щелчком и удержанием левой кнопкой мыши в одном угле эле- мента перемещайте курсор от начала окна, затрагивая и изменяя масштаб области изображения. (Ярлык: Ctrl + Высокий звук + Левая кнопка мыши)
Ø	Вращение	Вращайтесь (беспрепятственное), объекты в ОКНЕ ЭКРАНА ДИС- ПЛЕЯ могут подвергнуться бес- препятственному вращению, удерживая левую кнопку мыши. (Ярлык: Ctrl + Левая кнопка мы- ши)
8	Вращение вокруг оси Х	Это позволяет вращать объекты вокруг оси X или в экранной системе ко- ординат
8	Вращение вокруг оси Ү	Это позволяет вращать объекты вокруг оси Y или в экранной системе ко- ординат
3	Вращение вокруг оси Z	Это позволяет вращать объекты вокруг оси Z или в экранной системе ко- ординат
Продолжение табл. №3

Значок	Функции	Описание	
Иконки ридорых операций			
×	Изометрический вид		
		Х-осевое	
		представле-	
		ние в плос-	
+× -×	Вид в плоскости YZ	кости из	
		экрана (+)	
		или в экран	
		(-)	
		Ү-осевое	
		представле-	
		ние в плос-	
l+r ⊢r	Вид в плоскости XZ	кости из	
		экрана (+)	
		или в экран	
		(-)	
		Z-осевое	
		представле-	
		ние в плос-	
+z -z	Вид в плоскости ХҮ	кости из	
		экрана (+)	
		или в экран	
		(-)	

Окончание табл. №3

Объекты могут вращаться, в экранной или объектной системе координат. Значение установок Show current object mark по умолчанию должны использовать Объектные Contact display Use step cache координаты, где вращение относительно оси (🎬 Measure или 🖾) находится в отношении к изометри-View Fit View Back ческой триаде XYZ осей в правой нижней части Auto Fit Use object coord for rotation ОКНА ЭКРАНЕ ДИСПЛЕЯ. Load viewport Иногда, однако, полезно вращать объекты, Save viewport Picking mode используя Экранную систему координат, где Х – **Picking sensitivity** направлена направо, Y, определена, и Z направле-Theme Set as default

направлена направо, 1, определена, и 2 направле на из экрана. Активизировать вращение, используя Экранные координаты, можно правым щелчком в ОКНЕ ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ.

Для получения соответствующих данных может быть выбрана любая точка в ОКНЕ ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ. Можно измерить расстояния между двумя точками на одном объекте или между двумя точками на различных объектах.

Таблица №4 Значки Выбора Точек

Properties.

Значок	Функция	Описание
	Измерение расстояния	Измерение расстояния между любыми двумя точками может быть осуществле- но указанием первой точки и последую- щим выбором второй точки.
K	Выбор	По умолчанию используется режим ви- зуального отображения, применяется для выбора видов и получения информации о элементах и узлах. Также применяется при измерении.

Другие Значки ОКНА ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ приведены в таблице №5.

Следующие значки также используются при рассмотрении объектов в ОКНЕ ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ:

Таблица №5

Значок	Функция	Описание
	Представление от- тененных закра- шенных объектов	Все объекты отображаются с тенями, без сетки
Ø	Просмотр только сетки объекта	Все объекты отображаются с явной сеткой
	Просмотр затенен- ных объектов	Все объекты показываются за- тушеванными с сеткой
Ø	Просмотр поверх- ностной сетки	Будут показаны только харак- терные линии объектов
	Освежить	Обновляется окно ЭКРАН и очищается от других предыду- щих измерительных линий
*	Закрепить вид	Фиксирует все объекты на окне ЭКРАН
\$	Предыдущий вид	Назад Возвращается назад к по- следнему используемому пред- ставлению
٥	Захватить картинку	Делает снимок с ЭКРАНА и со- храняет изображение в файл
5	Печать	Делает снимок с ЭКРАНА и по- сылает его на принтер

4.2.1. Сохранение Проблемы

Настал подходящий момент для сохранения Ваших данных. Чтобы сохранить данные в базу, необходимо выбрать File -> Save (Файл -> Сохранить) или щелкнуть по иконке Сохранить. Информация будет сохранена в файле с именем **Block.key**.

4.2.2. Выход из Deform-3D

Если Вы хотите продолжить работу по Лабораторной работе №2, то нет необходимости выходить из Deform-3D.

Если же Вы завершаете работу, то выйти можно щелкнув значок *Exit* (Выход). Как только Вы вернетесь в окне MAIN (Главное), то можно выйти из Deform-3D, выбирая File -> Exit или щелкнув . Когда появиться запрос:



4.2.3. Открытие предварительно сохраненной проблемы

Запустите Deform-3D, когда откроется окно MAIN (Главное), щелкните по папке Block в списке Каталогов на левой стороне экрана, после этого подсветиться Block.key в списке файлов. Обратите внимание, что при этом на окне Предварительного просмотра появиться изображение, напоминающее снимок с экрана с проблемы, над которой Вы работали ранее. Откройте пре-процессор.

4.2.4. Импортирование инструментов

В предыдущей лабораторной работе в проблему была импортирована неустойчивая заготовка. Теперь настал момент для импорта инструментов. Внизу под Деревом объектов дважды щелкните кнопку Insert Object (Вставить объект), после чего в Дереве объектов добавятся Объекты 2 и 3.

4.2.5. Вставка инструментов

4.2.5.1. Верхний инструмент

Подсветите Объект 2 в Дереве объектов и измените Имя Объекта на Тор Die (Верхний Инструмент). Определите геометрию верхнего инструмента щелчком по кнопке Geometry, и затем Import... перейдите в каталог DEFORM3D\V5.0\Labs и выберете файл Block TopDie.STL.

Геометрия

Верхний инструмент должен быть видим в ОКНЕ ЭКРА-НА ДИСПЛЕЯ. Существует хороший инструмент, позволяющий проверить геометрию объекта после импортирования в Deform, чтобы пользователь мог удостовериться, что с ней не будет никаких проблем.

Для проверки геометрии щелкните по кнопке ^{Сheck GEO}. По результатам проверку появиться окно GEOMETRY CHECKING, в котором они будут отражены.



Рис. 47. Главное окно с предпросмотром выбранной задачи

Для объекта, который имеет замкнутый объем, там должны появится следующие значения: 1 поверхность, 0 свободных граней, и 0 недопустимых объектов (поскольку можно продвигаться по кругу). Объекты, которые импортированы, с поверхностями или телами, не имеющими свободных краев, должны все иметь только 1 поверхность.

В дополнение к вопросу, имеет ли импортированная геометрия проблемы, должна также быть проверена ориентация геометрии. Если геометрия представляет собой замкнутый объем, то правильная ориентация будет определена тогда, когда поверхностные нормали указывают из объекта. В случае, если геометрия – не является замкнутым объемом, то, правильная ориентация определена, в случае, если нормали обращены к заготовке.

Geon	netry Checking Result	×
•	Surface information Number of points Number of polys No of surfaces Ho of free edges Poly with invalid edges Poly with invalid orientation Foly with shall area	2
	Surface area 151 999 Min polygon area 6	
	Hax polygon area 24 Nin edge length 2	
	Max edge length 10	3
	A clean geometry should usually have only ONE surface and no invalid polygons (edge, orientation, area) If invalid polygons exist they may cause problems when running a simulation	10100
	OK	

Рис. 48. Окно результатов проверки геометрии

Щелкните по кнопке Show/Hide Normal, чтобы рассмотреть поверхностные нормали, и если поверхностные нормали пра-

вильно высвятяться из объекта, то нажмите кнопку <u>В</u>еverse GEO

4.2.5.2. Нижний инструмент

Подсветите Объект 3 в Дереве Объектов. Щелкните по 3 General и измените Имя Объекта на Buttom Die (Нижний кнопке \square Geometry инструмент). Импортируйте геометрию, нажимая и за-Import. Геометрия тем находится В файле Block BottomDie.STL. Используйте кнопки проверки геомет-Show/Hide Normal Check GEO , чтобы удостовериться, что рии она не имеет никаких проблем, и что нормали правильно указывают из объекта. На этом этапе все три объекта должны отобразиться на дисплее.



Рис. 49. Результат вставки геометрии объектов

4.2.5.3. Установка движения инструментов

Если какой-либо из инструментов перемещается, то его движение должно быть определено. В этой задаче, чтобы сжать Блок, будет Верхний инструмент перемещаться вниз.

Щелкните на Верхнем инструменте в Дереве Объектов. Так как это объект, который будет двигаться, то он должен быть определен как Первый Инструмент. Это можно увидеть, на иконке 🎯 рядом с первым инструментом.

Чтобы определять движение, щелкните по кнопке

Movement. Инструмент будет перемещаться вниз с постоянной скоростью 1 дюйм/секунду. Тип движения должен соответствовать скорости

Установите поле Speed (Скорость) на значение Constant (Постоянная)1 в/вторичный. Правильным направлением для этой задачи будет направление по умолчанию – ось Z

Что такое ход?

Данные по ходу при движении объектов представляют собой ту меру, характеризующую как далеко объект двигался с начала моделирования.

В большинстве случаев (кроме случая использования модели механического пресса) значение хода необходимо оставлять на нуле в начале моделирования, а затем оно изменится автоматически по ходу выполнения моделирования.

В качестве желаемого перемещения могут быть заданы любые функции.

4.2.5.4. Установка объектной температуры

Физические свойства и типы потоков напряжений определены как функции температуры, и поэтому, даже при если температура может и не изменяется при моделировании, то все равно температура заготовки должна быть определена правильно.

Когда объекты только что вставлены в Дерево объектов, то они имеют температурные значения по умолчанию, что составляет значение 680F или 20²⁶C, в зависимости от того, в каких единицах используется система. Это соответствует деформированию при комнатной температуре, и может быть проверено, если посмотреть на поле Temperature (Температура) на Объекте.

Данные. Для этого моделирования, 680F будет правильной температурой и нет необходимости ее менять.При постановке моделирования должны быть определены для объектов свойства материалов. Для заготовки назначают тип материала Пластичный, потому что пластические напряжения потока необходимо определить.

4.2.5.5. Установка свойств материала

Кроме того, если моделирование было неизотермическое (с температурой, изменяющаяся со временем), тогда определение тепловых свойств также необходимо было бы выполнить.

Speed)	Direction	1	~ -×
Force	CY	3	τΥ
	C Z	0	7-2
	C Other 0	0	1
 Denned 	Constant 3	P.	an ere
C User Rou	tine 0		- Miles
C User Rou Stoke	tine [0		
C User Rou Stoke	tine [0 in		
User Rou Shoke Speed Land	tine 0		

Рис. 50. Закладки определения движения

Свойства материала инструментов нет необходимости определять, потому что для этих объектов установлен тип Твердый (и моделирование считается изотермическим), в следствии этого инструмент не подвергается никакой деформации после приложения загрузки. Щелкните по значку Мaterial, чтобы открыть окно MATERIAL. Заготовка в этом моделировании должна применяться из стали AISI-1035. Чтобы импор-

тировать этот материал, нажмите кнопку Load from lib. и затем выберете необходимый материал от списка.

Category	Material Label	Load
Aluminum Die_material Other Stainless_steel Steel	A(SI-1016[1650-2200F[900-1200C]] A(SI-1020[Machining] A(SI-1025[Machining] A(SI-1025[1800-2200F[1000-1200C]] A(SI-1020[Machining]	<u>Cancel</u>
Superaloy Titanium	AISI-1035 COLD/70-400F(20-2000) AISI-1035[130-2000F(700-11000)] AISI-1043[COLD[77-200F(20-1000)] AISI-1043[1300-2000F(700-11000)] AISI-1045[EFRC]	Delete

Рис. 51. Окно библиотеки выбора материалов

Материалы разделены на категории, поэтому, чтобы найти сталь, выберете категорию Сталей. Материал может быть представлен двумя различными характеристиками – одна для деформирования в холодном состоянии, а другая – для горячего. Для этого случая остановимся на характеристике для материала для комнатной температуры, поэтому выберете 'AISI-1035, ХОЛОДНЫЙ' материал.

После подсвечивания материала в списке, щелкните по кнопке , чтобы импортировать материал в проблему.

Пластичные характеристики напряжений потоков могут просмотрены в виде графиков, простым щелчком по кнопке рядом с Потоком напряжений в контекстом меню. Щелкните кнопкой когда закончите просмотр данных, щелкните по кнопке Сюзе. В Объектном Дереве, Вы увидите, что 'AISI-1035, ХОЛОД' добавился как материал для объекта Block.

4.2.5.6. Параметры управления моделированием

Для открытия диалогового окна SIMULATION CONTROL щелкните по кнопке Simulation Control. Щелчком по кнопке Step можно проконтролировать время моделирования. Проверите, что Номер Начального Шага установлен на -1.

Отрицательный признак указывает на то, что это шаг, который создан Пре-процессором (шаги решения записываются в базу данных в течение моделирования). Установите значение Числа Шагов Моделирования на 20. Если преждевременно происходили остановы моделирования, то программа не выполнит 20 шагов. Для решения этой проблемы установите величину Приращения Шага, равную 2. Через каждую секунду очередной шаг моделирования будет добавлен в базу данных.

Обратите внимание, что Первый Инструмент, так же отобразится в этом окне. Мы предварительно установили, что первый инструмент является Верхним инструментом, и инструментом, положение которого будет использоваться для остановки процесса и контроля шага.

Теперь необходимо определить соответствующую еличиину шага моделирования. Для большинства процессов, количество инструментов совершающих за шаг один ход, должно быть установлено приблизительно 1/3 типичной длины края элемента.

Чтобы определить эту величину, можно использовать ин-

струмент Мера

Щелкните по кнопке и затем измерьте длину любого длина края на объекте Block (Bam, вероятно, придется щелк-

нуть , чтобы рассмотреть теневое представление). Типичная длина края составляет приблизительно 0.4». Одна треть от 0.4» – приблизительно составит 0.13». Согласно Определению Шагов Решения, введите значение 0,13. Щелкните по кнопке

<u>ОК</u>, когда завершите и закройте окно SIMULATION CONTROL.

Main	fiened Advanced1 4	idvanced 2		QK
Ship Ship Refrecti Calana Renvin Praces Candian Advanced Control File	Starling They Number Number of Simulation Staps Site: Incomment to Sove Primary Day Solution States Description With Constant Dis Displ (*** With Constant Time Incom	TopDe acconent U12 wment U	00 मा मा मा मा	<u>C</u> entra

Рис. 52. Диалог настройки задачи

4.2.5.7. Позиционирование объектов

Откройте окно OBJECT POSITIONING, щелкнув по кнопке 💽 станут доступны следующие различные методы позиционирования Deform-3D:

Таблица №6 Методы позиционирования

Кнопки	Описание
Ø Mouse driven	Объекты могут быть установлены с помощью
	мыши перетаскиванием их по ОКНУ ЭКРАНА
	ДИСПЛЕЯ
	Объекты могут быть размещены в определен-
	ном направлении, они будут перемещаться и вра-
	щаться, до тех пор, пока не остановятся в состоянии
O,	равновесия относительно других объектов. Гравита-
Drop	ционное позиционирование используют в том случае,
	когда для исходной позиции объекта неоднозначно
	указаны тип урегулирования положения на имеющий
	форму впадины поверхности

Окончание таблицы №6

Кнопки	Описание
Dffset	Объекты могут быть перемещены на опреде- ленное расстояние любым заданным вектором или с помощью определения точек начала и конца переме- щения
C Interference	При интерференционном позиционировании, размещаемый объект будет перемещаться так, чтобы он немного пересекал другой объект
C Rotational	Объекты могут вращаться по заданному углу относительно любой оси
& Advanced	Регулируемое позиционирование подобно гра- витационному и используется в случае, если началь- ное положение объекта несколько неточно определе- но. Гравитационное позиционирование, однако, яв- ляется новым методом позиционирования, который имеет тенденцию к получению лучших результатов в большинство случаев

4.2.5.8. Позиционирование мышью

Щелкните по кнопке Моике diven, и выберите объект позиционирования Block. В окне ЭКРАНА ДИСПЛЕЯ, щелкните на стрелке +Z, и потащите Block вверх так, чтобы он больше не находился на объекте Buttom Die. Рядом со стрелкой +Z расположена звездочка, показывающая, что в настоящее время направление перемещения отобрано.

Переключитесь на объект позиционирования Тор Die, и используйте стрелку +Z, чтобы переместить его вверх до тех пор, чтобы он больше не находился в контакте с Block, и затем использовать стрелку -Y, чтобы разместить его в положении, показанном ниже.

4.2.5.9. Гравитационное позиционирование

В качестве примера возможностей гравитационного позиционирования, давайте опустим объект Block на Buttom Die.

Для этого щелкните кнопкой и переключите объект позиционирования на Block. Измените направление на -Z и щелкните <u>Арру</u>, чтобы выполнить позиционирование.



Рис. 53. Выбор точки и направления позиционирования инструментов.

4.2.5.10. Позиционирование смещением

В качестве примера использование позиционирования смещением, давайте передвинем Тор Die так, чтобы он непосредственно находился на вершине объекта Buttom Die.

Щелкните кнопкой ., и переключите объект позиционирования на Тор Die. Существует два метода позиционирования смещением: 1) задание вектора перемещения или 2) определение точек начала и окончания перемещения. Чтобы определить необходимое расстояние любой из этих вариантов позволяет использовать мышь. Самым легким путем является указание точек вершин объектов Тор Die и Buttom Die, которые будут использоваться при позиционировании. Существует две опции выбора точек.



Рис. 54. Результат совмещения точек инструментов

4.2.5.11. Позиционирование с пересечением

Тор Die должен теперь находиться непосредственно на вершине объекта Buttom Die. Давайте воспользуемся позиционированием с пересечением для того, чтобы вернуть объект Тор Die назад на правильную позицию по вершине объекта Block.

Щелкните по кнопке Interference. В открывшемся диалоге позиционирования, объектом позиционирования будет выбран уже Тор Die. Измените ссылку таким образом, чтобы переопределить его на Block.

Так как объект Тор Die, имеет возможность перемещаться вниз, то чтобы войти в контакт с вершиной объекта Block, измените направление перемещения на -Z. Щелкните кнопкой <u>Арру</u>, чтобы установить Тор Die.



Рис. 55. Результат позиционирования

Обратите внимание:

В любое время, когда вы находитесь в окне **OBJECT POSITIONING**, для возвращения объектов в их начальные позиции до завершения объектного позиционирования может быть использована кнопка

Когда завершите объектное позиционирование, нажмите кнопку <u>к</u>, чтобы выйти из диалога **OBJECT POSITIONING**.

4.2.5.12. Межобъектные отношения

Для определения отношений между объектами щелкните по кнопке Inter-Object. Так как никакие отношения в настоящее время не определены, то появиться запрос хотите ли Вы, чтобы система определила межобъектные отношения для Вашей проблемы.

Щелкните <u>Уез</u>. При этом появиться окно INTER-OBJECT с уже определенными двумя отношениями. Отношения в терминах Deform означают определение объектов, которые будут производить и воспринимать некоторое воздействие. В этом моделировании, заготовка деформируется между двумя твердыми инструментами.

Твердые инструменты определены как воздействующие объекты, а деформируемая заготовка определена как объект, на который будет выполняться воздействие. Для каждого из этих отношений необходимо определить несколько свойств интерфейса (главным образом это трение и коэффициент теплового расширения).

Так как в этом моделировании мы не будет принимать во внимание коэффициент теплового расширения, то единственным параметром, который должен быть определен - трение. С первыми выдвинутыми на первый план отношениями, щелкните кнопкой *ваш*, чтобы изменить отношения.

В параметрах настройки трения на экране, есть меню, которое позволяет пользователю выбирать соответствующие условия трения общих процессов деформирования. Так как это моделирование осуществляется при комнатной температуре, в инструментах из стали, необходимо использовать меню и выбирать **Холодное деформирование в** открывшегося списка.

При этом будет автоматически установлено значение коэффициент трения, равное 0,12. Щелкните по кнопке чтобы возвратиться к главному окну INTER-OBJECT.

Теперь, когда отношения между объектами **Top Die** и **Block** были определены, то необходимо также определить отношения между объектами **Buttom Die** и **Block**.

Так как условия трения те же самые, то для копирования свойств первого из имеющихся объектов всем остальным мо-

tper F Troop	of the set of the	6
r ole	Pitere (File)	Conversion of Conversion
100		Artigiciana Artigiciana Artigiciana Artigiciana
inne.		

жет использоваться кнопка



После того, как это будет сделано, оба отношения будут иметь значение коэффициента трения, равного 0,12.

Как только отношения между объектами будут определены, то необходимо выполнить соприкосновение объектов. Когда контакт будет произведен, то любые узлы на деформируемом объекте в пределах указанной точности на воздействующем инструменте.

Но перед выполнением контакта, мы должны разумно определить значение точности совпадения. При слишком большой точности система разместит слишком много узлов в контакте с поверхностью инструмента, которая может вызвать деформационную петлю в заготовке.

Слишком маленькое значение точности будет означать, что в окрестности контакта ни будут найдены никакие узлы, и

контакт не будет произведен. Щелкая по кнопке 🔳 в окне определения точности Deform, установите разумную степень точности.



Рис. 57. Диалог определения отношений между объектами

Точность 0.0112 рассчитывается автоматически. Как только эта точность будет установлена, чтобы произвести контакт между объектами щелкните по кнопке

Контакт будет произведен между объектами **Block** и двумя инструментами, и этот контакт отобразится в окне ДИС-ПЛЕЙ цветными точками на вершине и поверхности основания объекта **Block**.

Обратите внимание:

Если установлена слишком большая точность, используемая при выполнении контакта, и появляется деформационная петля в заготовке, то для уничтожения записи контакта может быть использована кнопка

4.2.5.13. Генерация базы данных

Как только проблема была полностью подготовлена, то последним шагом перед расчетом будет генерация файла базы данных. Конечно-элементное ядро (часть Deform, которая выполняет Начало моделирования

Теперь Вы готовы начать моделирование, что выполняется нажатием Старт (Run) в списке Моделирование (Simulator).

Simulator	*
Run (option)	
Batch Queue	
Bun	
Stop	
Add to Queue	

Рис. 58. Часть меню главного окна программы Deform-3D

Ход моделирования может быть проверен если посмотреть на закладку Файл сообщений. Щелкните закладку Сообщение (Message), чтобы посмотреть на Файл сообщений. Поскольку опция проверки включена и установлен параметр по умолчанию, Файл сообщений будет обновляться каждые несколько секунд.

Файл сообщений отображает информацию о текущем шаге моделирования и также дает информацию, как хорошо это моделирование выполняется. Когда моделирование завершится, появиться следующее сообщение до конца Файла сообщения:

NORMAL STOP: The assigned steps have been completed

4.2.5.14. Анализ результатов

После того, как моделирование завершится, щелкните на строчку Deform-3D Post под меню Постпроцессор, после чего появиться окно Пост-процессора.



Рис. 59. Окно пост-процессора программы Deform-3D

4.2.6. Пост-процессор и анализ результатов

4.2.6.1. Выбор шага

Выбирать шаг для анализа можно с помощью раскрывающегося списка меню, расположенного сверху окна. Используйте этот список, чтобы выбрать шаг.



Рис. 60. Выбор шага моделирования для последующего анализа

Чтобы раскрыть окно STEP LIST, которое позволяет пользователю определять более детальные параметры настройки шага, можно использовать кнопку . Для выбора шага моделирования станут доступными следующие кнопки:

I.	первый шаг
	на один шаг назад
-	воспроизвести назад
	остановить воспроизведение
>	воспроизводить вперед
•	на один шаг вперед
F	последний шаг

Чтобы посмотреть на деформацию заготовки, воспроизведите шаги.

4.2.6.2. Фазовые переменные

Некоторые из обычно используемых фазовых переменных могут быть проанализированы при использовании раскрывающегося списка Фазовые переменные, расположенного наверху окна.



Рис. 61. Выбор необходимой для анализа фазовой переменной

Выберите пункт Напряжения (Strain) - эффективный инструмент, позволяющий количественно оценить деформацию, которой подверглась заготовка. Щелкните по кнопке ⁽¹⁾, чтобы раскрыть окно STATE VARIABLE, и выберете опцию ⁽²⁾ Steps global Macштабирование (Scaling).

Эта опция будет использовать понятия глобального минимума и максимума эффективных напряжений, как конечных отметок на цветной полосе. Чтобы просмотреть накопленные напряжения, воспроизведите шаги моделирования.

Фазовая переменная, которые представляются несколькими переменными в раскрывающимся списке могут быть отображены в виде графика функции. Для просмотра всех вариантов отображения фазовых переменных, используйте кнопку

4.2.6.3. Отслеживание точки

В Deform имеется возможность для анализа точек в объекте по ходу моделирования. При этом может быть прослежена не только положение точек, но также и значения фазовых переменных в этих положениях.

Для открытия окна POINT TRACKING, щелкните по кнопке . Пусть, мы хотим определить несколько точек на неискаженной геометрии и посмотреть, куда они будут перемещаться во время деформации. Чтобы посмотреть неискаженную геометрию, щелкните на кнопку . и перейдите на первый шаг моделирования. Теперь определите три характерных положения на заготовке (близко к показанным ниже) по щелчку на кнопку .

Примите значение Опции Прослеживания по умолчанию и щелкните — Enish Если была выбрана для анализа значение Эффективные Напряжения, то они будут выданы на графике в зависимости от времени для трех точек, которые были выбраны ранее, и при этом добавятся следующие объекты в Дереве Объектов:



Рис. 62. Примерное расположение точек для отслеживания

[v] PointTracking - Points 3, Steps 11[-1->20].

Если никакая фазовая переменная не была представлена в виде графика, когда точки были прослежены, то в Дереве Объектов отобразиться следующее:

[v] PointTracking - No state variable has been assigned.

Когда выбрана та или иная фазовая переменная из раскрывающегося меню Фазовые переменные, то для отслеживаемых точек на ДИСПЛЕЕ появиться график соответствующих функций. Щелкните по кнопке , чтобы воспроизвести шаги. Обратите внимание, что соответствующий шаг для точки будет прослеживаться на графике. Щелкните по кнопке , чтобы остановить воспроизведение на текущем шаге.

Теперь щелкните где-нибудь на пути отслеживаемой точки, - выбранный шаг, отобразится на окне ДИСПЛЕЯ и должно измениться соответствующее местоположение на графике. В Deform-3D существует возможность выбора сектора объекта и проведения его последующего анализа значений различных фазовых переменных в пределах объекта.

Для этого сначала надо скрыть график отслеживания точек, щелкнуте правой кнопкой мыши по прослеживанию точки в Дереве объектов и выберете пункт Hide Point Tracking.



Рис. 63. Результат отслеживания точек

4.2.6.4. Разрезание объектов



Щелкните по значку , чтобы открыть окно SLICING (Разрез). Объекты могут быть разрезаны по нескольким различным направлениям. Объекты в ДИСПЛЕЕ отображаются желтым прямоугольным блоком, окружающим их. Горизонтальная плоскость разреза будет создана нажатием на вертикальном краю объекта Block.

Нажатием на горизонтальном краю объекта Block, будет создана вертикальная плоскость разреза. Щелкните несколько раз по различным желтым блокам, чтобы поэкспериментировать с этой опцией.



Рис. 64. Выбор плоскости разреза

Плоскости разреза определяются точкой на плоскости и нормальным направлением на эту плоскость. Они определяются в окне SLICING P и N (Нормаль).

Объекты могут также быть разрезаны, выбором направлений X, Y, или Z и последующим их сдвигом этой координаты вверх или вниз. Так объекты на том или ином шаге будут динамически разрезаться. Щелкните по координате X точки, поскольку двигаемся по кругу, как показано ниже, и затем переместитесь на шаг назад или вперед по направлению к сектору объекта.



Рис. 65. Диалог задания плоскости вводом координат

Для определения отображения разрезаемых поверхностей доступны несколько вариантов.



Рис. 66. Отображение разрезанной модели

4.2.6.5. Выход из Deform-3D

Когда Вы завершите, выйдите из постпроцессора, щелкнув по значку **E**xit.

Когда Вы вернетесь в окно MAIN (Главное), то щелкните , чтобы выйти из Deform-3D.

Когда Вы генерируете базу данных в препроцессоре Deform, то вся информация, определенная в препроцессоре (типа свойств материалов, контроль движения, геометрия объектов, и т.д.) будут переданы в файл базы данных. Чтобы открыть окно DATABASE GENERATION щелкните по кнопке . Щелчок по кнопке Check, заставит программу выяснить, если какие-нибудь пропущенные данные в проблеме при установке.

В течение проверки процесса могут показаться те данные, которые должны быть установлены перед выполнением моделирования (например, если Вы забудьте определять любые свойства материалов), при этом программа будет считать, что задача была подготовлена неправильно. Б

аза данных может еще генерироваться, если; даже отсутствуют некоторые поля, но пользователь должен лишний раз проверить, чтобы убедиться, что все данные в порядке. В этом моделировании мы будем иметь дело с инструментом Компенсации Объема.

4.2.6.6. Сохранение Проблемы

База данных для проблемы была только что сгенерирована. Настал подходящий момент для того, чтобы сохранить файл проблемы. Щелкните по значку и файл ключевого слова по имени Block.key будет сохранен. Чтобы возвратиться в главное окно, щелкните по кнопке .

4.2.6.7. Начало моделирования

Теперь Вы готовы начать моделирование, что выполняется нажатием Старт (Run) в списке Моделирование (Simulator).



Рис. 67. Часть меню главного окна программы Deform-3D

Ход моделирования может быть проверен если посмотреть на закладку Файл сообщений. Щелкните закладку Сообщение (Message), чтобы посмотреть на Файл сообщений. Поскольку опция проверки включена и установлен параметр по умолчанию, Файл сообщений будет обновляться каждые несколько секунд.

Файл сообщений отображает информацию о текущем шаге моделирования и также дает информацию, как хорошо это моделирование выполняется. Когда моделирование завершится, появиться следующее сообщение до конца Файла сообщения:

NORMAL STOP: The assigned steps have been completed

4.2.6.8. Анализ результатов

После того, как моделирование завершится, щелкните на строчку Deform-3D Post под меню Постпроцессор, после чего появиться окно Пост-процессора.



Рис. 68. Окно пост-процессора программы Deform-3D

4.3. Решение задач моделирования технологических процессов обработки металлов давлением методом конечных объемов в MSC.SuperForge (Simufact Forming)

Сразу же после запуска программы MSC.SuperForge на экране появиться ее главное окно следующего вида (рис. 76).

Для упрощения работы с подготовкой данных функции пре- и постпроцессора реализованы в единой программной оболочке, Экран которой разделен на три части (рис. 77).

Дальнейший этап подготовки данных производится только после создания нового проекта, выполнить это действие можно только после щелчка по кнопке New Project (Новый проект), в результате чего в дереве проекта появиться следующая структура данных (см. рис. 78).

Расстановку данных по вышеуказанным категориям производится простым перетаскиванием соответствующих величин, взятых из дерева данных. Дерево данных организуется после щелчка правой кнопкой мыши в поле дерева данных. По выполнению щелчка на экране появиться контекстное меню следующего вида (рис. 79).

В общем, технологические данные и параметры, которые необходимы для проведения моделирования, можно разделить на пять основных групп, описание которых приведем в таблице №7.



Рис. 76. Интерфейс пользователя программы MSC.SuperForge



Рис. 77. Структура экрана



Рис. 78. Организация структуры данных

Табл. №7

N⁰	Группы данных	Описание	Источники данных
1	Геометрия заго- товки и инстру- ментов	STL-файлы с	Твердотельные мо-
		моделями заго-	дели, импортируе-
		товки и инстру-	мые из CAD-
		ментов	системы
2	Свойства матери-	Сопротивление	Хранятся в базе
	ала	деформации и	данных программы
		теплофизические	и выбираются из
		свойства ин-	нее при подготовке
		струментов и	данных на расчет по
		заготовки	наименованию ма-
			териала

Исходные данные для расчета

Окончание таблицы №7

№	Группы данных	Описание	Источники дан-
			НЫХ
3	Характеристики оборудования	Сопротивление деформации и теплофизические свойства инстру- ментов и заготов- ки	Хранятся в базе данных програм- мы и выбираются из нее при подго- товке данных на расчет по назва- нию оборудования
4	Характеристики смазки	Фактор трения и коэффициент теп- лопередаче	Хранятся в базе данных програм- мы и выбираются из нее при подго- товке данных на расчет по назва- нию смазки
5	Основные пара- метры процесса	Температура нагрева слитка, время охлажде- ния, конечное рас- стояние между инструментами и т.д.	Задаются шаг за шагом в порядке следования закла- док подготовки данных в опера- циях Forming и Cooling

Ввод этих данных производится посредством специализированных диалогов (рис. 5).

Технологический процесс при моделировании штамповки может рассматриваться как последовательность операций, производимых с заготовкой, объединенных в технологическую цепочку. Каждая из операций рассматривается как объект моделирования и может включать в себя:

- 1) переходы штамповки;
- 2) нагрев;

3) остывание;



4) термическую обработку и т.д.

Рис. 79. Диалоги контекстного меню при выборе необходимого пункта

При подготовке к расчету технологической цепочки, состоящей из нескольких операций, всегда соблюдается следующее правило: сначала задаются свойства текущей операции, а затем к цепочке добавляется следующая операция.


Рис. 80. Диалоги подготовки данных

Твердотельные модели деталей импортируются в систему с помощью геометрических данных, хранящихся в *.STL-

файлах. Этот формат аппроксимирует геометрию твердотельных моделей заготовки и инструментов совокупностью треугольных элементов, описывающих поверхность (рис. 81).



Рис. 81. Модель, преобразованная в *.STL-формат

Сетка из треугольных элементов, полученная при экспорте из CAD-системы, необходима для генерации объемной сетки, которая опирается на грани построенных элементов и описывает имеющийся объем. Элементы сетки могут быть следующей формы:

- 1) по умолчанию (параллелепипед);
- 2) гексагональные;
- 3) тетрагональные.

Постепенное увеличение числа граней, а следовательно, и узлов, приводит к повышению точности решения, за счет увеличения потребного машинного времени, необходимого для проведения вычислений.

MSC.SuperForge применяется как для двумерного, так и для трехмерного моделирования деформации металла. В двумерном случае рассматривается некоторая плоскость, в которой происходит течение металла, а в трехмерном – полное течение во всех плоскостях. При штамповке круглых в плане поковок металл растекается равномерно во все стороны относительно оси симметрии.

Такое течение металла называют *осесимметричным*. В этом случае плоскость течения металла – это меридиональное сечение поковки. Все сечения одинаковы и симметричны вокруг оси, поэтому для моделирования достаточно лишь правой половины одного из них (рис. 82).



Рис. 82. Пример осесимметричной поковки

В случае моделирования техпроцессов штамповки деталей, для которых размеры элементов различны в трех измерениях, технологические переходы штамповки детали необходимо формировать средствами современных CAD-систем, например, SolidWorks. На этом этапе также можно выполнить и начальное позиционирование инструментов.

Рассматриваемый подход основывается на предварительной подготовке моделей заготовки и инструментов по всем технологическим переходам в CAD-системе в единой системе пространственных координат.

Выравнивание объектов достигается с помощью типовых операций создания сборочных единиц – сопряжений, к которым можно отнести следующие стандартные типы (рис. 83):

- 1) совпадение;
- 2) параллельность;
- 3) перпендикулярность;





При построении твердотельных моделей необходимо учесть, что именование файлов, предназначенных для экспорта и дальнейшего импорта в расчетный пакет лучше выполнять латинскими буквами (см. табл. 2).

Для экспорта моделей в системе SolidWorks достаточно выполнить диалог команды Файл -> Сохранить как..., в котором необходимо указать название сборки и выбрать тип файлов (рис. 84) и щелкнуть по кнопке Сохранить...

Табл. №2 Классификация исходных данных

Имя	Обозначение	Имя	Обозначение
Заготовка	Wpiece	Вспомогательный инструмент 1	Die1
Верхний инструмент	Topbutton	Вспомогательный инструмент 2	Die2
Нижний ин- струмент	Lowbutton	Вспомогательный инструмент 3	Die 3



Рис. 84. Диалог Сохранить как...

При отсутствии каких бы то ни было проблем с геометрией, SolidWorks выдаст следующее сообщение (рис. 85). При положительном ответе на этот вопрос будет произведено сохранение твердотельных моделей в виде *.STL-файлов по следующей структуре:

<имя сборки>-<имя модели>.stl



Рис. 85. Предварительный просмотр перед экспортом

4.3.1. Функциональные возможности пре-процессора

Геометрические отношения и расположение объектов в пространстве возникают исходя из размеров штампового пространства применяемого технологического оборудования и непосредственной цели проведения моделирования.

И чтобы их обозначить, необходимо учесть начальное и конечное положение инструментов при выполнении технологической операции. Начальное положение инструментов устанавливается при помощи специальных инструментов позиционирования и установки межобъектных отношений (рис. 86).



Рис. 86. Инструменты для работы над моделями.

При щелчке по кнопке 🕮 Камера станут активными инструменты, с помощью которых можно управлять окном препроцессора:



- вращение экрана;

- увеличение экрана.

Кнопка 🕮 осуществляет перенос изображения на экране пре-процессора с сохранением межобъектных отношений, как показано на рис. 12.

Зачастую возникает необходимость просмотра модели технологического перехода под другим углом зрения, для чего в MSC.SuperForge существует инструмент вращения экрана, который вызывается щелчком по кнопке (рис. 87).





б) вид при перетаскивании

а) начальное положение



в) конечное положение

Рис. 87. Передвижение моделей



а) начальное положение





б) вид при вращении

в) конечное положение

Рис. 88. Вращение моделей

Увеличить часть изображения поможет инструмент, вызываемый щелчком по кнопке (рис. 14).



а) начальное положение



в) конечное положение

Рис. 89. Увеличение/уменьшение изображения моделей



б) вид при вращении

Увеличение/уменьшение изображения моделей наиболее удобно выполнять с помощью компьютерных мышей, сконструированных по технологии IntelliMouse (и соответствующей настройке колесика): вращение колесика от пользователя при нажатой кнопке 🚧 будет выполнять увеличение изображения, при обратном действии – уменьшение изображения.

Самыми простейшими инструментами, предназначенными для выполнения операции позиционирования, также расположены на рассматриваемой панели инструментов. После от-

ключения кнопки Камера становятся активными:



- перемещение модели;

- вращение модели (рис. 14);

- выбор модели.

Сдвинуть модель инструмента или заготовки по направлению одной из трех осей X, Y, Z позволяет инструмент Перемещение модели, который работает следующим образом (рис. 90).





б) вид при перемещении

а) начальное положение



в) конечное положение

Рис. 90. Сдвиг модели верхнего инструмента

Выбор направление сдвига осуществляется щелчком по одной из соответствующих кнопок:

Выполнение этих операций возможно как при произвольном значении шага перемещения/вращения, так и при задании конкретной величины, что выполняется после выбора операции и щелчка левой кнопкой мыши по кнопке Расстояние. В результате чего станет активным поле, расположенное справа от этой кнопки, в котором MSC.SuperForge будет ожидать от пользователя ввода конкретной величины.

Первым шагом при определении взаимодействия объектов является выполнение их точного позиционирования. Это можно осуществить, используя диалог команды Инструменты -> Позиционирование...

Задача позиционирования объектов ставится следующим образом. Пусть даны три объекта (верхний инструмент, заготовка, нижний инструмент), как показано на рис. 91.



Рис. 91. Начальное положение объектов

Позиционирование осуществляется относительно одного основного объекта – заготовки. При выполнении команды Ин-

струменты -> Позиционирование... MSC.SuperForge выдаст запрос (рис. 92) о сохранении данных.



Рис. 92. Запрос о сохранении данных.

После положительного ответа на этот запрос, программа вызовет мастер позиционирования, имеющий достаточно простой, но одновременно с этим функциональный интерфейс (рис. 93).



Рис. 93. Диалог позиционирования инструментов

В общем случае рекомендуется не менять настройки величин скорости приращения, допуска приращения, допуска на приращение скорости.

И для проведения позиционирования верхнего инструмента, достаточно выбрать его в Дереве проекта и щелкнуть

JMSC.SuperForge 2004 - [[Process1]]	
⁵ <mark>у ф</mark> айл <u>Редактирование</u> Просмотр <u>В</u> ставка	Инструменты Окна Справка – 🗗 🗙
Positioner [Process1,UpperDie]	≝ ♦ 耳 🛒 🖪 🖿 🖪 🖪 🛤 🖪
- Positioning	
Dawind/Daalay	
Advanced<< OK Cancel	
Stopped	
Details	
Last Calculated Frame =1	
-> Translational Velocity = 0 m/s	z
-> Rotational Velocity = 0 deg/s	<u>v</u> x
Tolerance for Translational Velocity 0.01	
Tolerance for Angular Velocity 0.05	
	асстояние 🔽 💷 🔽 🚺 🖿
Uerauit Positioner	NUM

Рис. 94. Положение инструментов после позиционирования

Теперь необходимо изменить положение нижнего инструмента, то его также необходимо выбрать в Дереве проекта

и щелкнуть кнопку **Т** (рис. 95).

Если пользователя устраивает текущее положение инструментов, то для завершения позиционирования достаточно щелкнуть кнопку

O MSC.SuperForge	Positioner [Process1,LowerDie]	
S _р <u>Ф</u> айл <u>Редактиро</u> Богліпд	Positioning	
Process	Rewind/Replay	
Opperble Opperble Opperble Of 8 - pue Press1 Sin Friction Opperble Opperble	Advanced<< OK Cancel Stopped Details	
SFrictior W DieTem → → WorkPiece → → 8 - zag → ♥ DB.Lea → ♥ WPTen	Last Calculated Frame =3 Current Frame =3 -> Translational Velocity = 0 m/s -> Rotational Velocity = 0 deg/s Tolerance for Translational Velocity 0.01	
Окружаюц	Tolerance for Angular Velocity 0.05	
Process1'	Translation Only (note: dies can ONLY translate)	

Рис. 95. Окончательное положение инструментов

4.3.2. Модуль моделирования процессов штамповки

Критерием окончания процесса моделирования является конечное положение инструментов, которое можно задать контролированием координат двух точек, расположенных на верхнем и нижнем инструменте.

Указать эти точки позволяет специальный инструмент Define point (Определить точки)..., который вызывается при выборе команды Инструменты -> Определить точки... (рис. 96).

Указание точек лучше всего проводить, когда модели двух других объектов будут отключены. Отключить изображение модели объекта позволяют инструменты панели Графическая (рис. 97).

почки	Определите точки 🔛	
	Point Name P3	
	Инструмен UpperDie	
	Координата по Х	Модель инструмента
	Координата по У 0	
	Координата по Z 0	
	Еди⊧ ГП Наузле	
	Добавь Измени Удали	
	Закрой	

Рис. 96. Диалог инструмента Определить точки



Рис. 97. Инструменты панели Графическая

Инструменты панели Графическая позволяют производить любые действия над моделью, расположенной в окне предпросмотра (см. таблицу №8).

Табл. №8

Функциональное назначение инструментов панели Графическая

Инструмент	Описание
	Осуществляет просмотр вида модели в окне
X2Y	предпросмотра в плоскостях ZY, ZX, YX, YZ,
	XZ, XY, и изометрий YZX и XZY
4	Выполняет возврат вида модели в заранее со-
	храненное состояние
*	Увеличивает размер изображения модели в
·•·	размер окна предпросмотра
	Выделением части модели рамкой сверху или
	снизу достигается масштабное увеличение
	выбранной области
	Устанавливает цвет одного из объектов моде-
•••	ли
<u>L</u>	Отображает все объекты закрашенными
P.	Отображает все объекты закрашенными с
	нанесенной поверхностной сеткой
L.	Отображает все объекты полупрозрачными
B.	Удаляет изображение объекта из окна пред-
1	просмотра
	Выполняет измерение расстояния между дву-
8,%Z	мя точками, расположенными на двух объек-
	тах модели
254	Выполняет построение разреза модели в окне
2	предпросмотра в указанной плоскости

Далее необходимо аналогичным образом выполнить удаление изображения заготовки, и вызвав команду Инструменты -> Определить точки... выбрать значение в поле Модель инструмента = Lower Die щелкнуть левой кнопкой мыши на поверхности нижнего инструмента. При этом для точного указания точки на поверхности необходимо, чтобы флажок в поле На узле был включен. Для завершения указания точки достаточно щелкнуть кнопку Добавь.



Рис. 98. Удаление изображения верхнего инструмента из окна предпросмотра

Аналогично выполняется указание точки на верхнем инструменте. Выход из этой команды осуществляется по щелку по кнопке Закрой.

После ввода двух точек на нижнем и верхнем инструментах можно переходить к формированию задачи моделирования. Для этого надо перейти в Дерево проекта и щелкнув правой кнопкой мыши выбрать команду Вставить->Управление моделированием->Формовка...

В закладках этого диалога (рис. 99, 100) устанавливаются значения следующих категорий:

- 1) ход;
- 2) размер элемента;
- 3) выводимые результаты;
- 4) тип задачи;
- 5) оптимизация решателя.

🕅 Мастер УправленияМоделированием 🛛 🔀	Укажите имя точки на	Укажите имя
Steda Evenerr Sae Dutpu Result, Potklem type (solve Optimize)	еерхнем иснтрументе Определите ход Токи Пресса Токи инструмента Расстояние от 100% хода 0К Закрыть	точки на нижнем инструменте /
	Задайте значение расстояния м	еждγ

Рис. 99. Диалог Мастера Управления Моделированием.

Рис. 100. Диалог Определения хода

инструментами в конце хода

Для задания конечного расстояния между верхнем и нижнем инструментами (при указанных точках) достаточно щелкнуть кнопку и выполнить предложенный MSC.SuperForge диалог.

После щелчка по кнопке ления Моделированием, расположенным слева от кнопки

появиться численное значение величины расстояния.

Далее необходимо перейти к закладке Element Size (Размер элемента), в которой необходимо установить размер элемента заготовки и размер элемента на инструменте, который представляет собой некоторое численное значение, характеризующее количество элементов на единицу объема заготовки. Размер элемента на инструменте (РЭИ) устанавливается из следующего соотношения:

На выбор размера элемента, кроме субъективных факторов, оказывает значительное влияние также учет машинного времени, необходимого для решения задачи (чем мельче размер элемента, тем мельче сетка, а следовательно, и необходимы значительно большие затраты машинного времени на решение задачи).

Постановка задачи моделирования производится последовательным переходом от закладки к закладке Мастера Управления Моделированием, и поэтому на данном этапе необходимо щелкнуть следующую закладку Выводимые результаты, которая установит дополнительные опции для проведения детального анализа процесса в окне постпроцессора (рис. 101).



Рис. 101. Диалог закладки Выводимые результаты

В этом диалоге пользователю предлагается указать число шагов моделирования, шагов переразбиения сетки конечных объемов и, если это необходимо, учет при расчете ряда дополнительных параметров для последующего анализа:

- 1) незаполение/зажимы;
- 2) возможность разрушения;
- 3) износ инструмента;
- 4) главные напряжения.

Число шагов для записи результатов устанавливается в поле Work Piece/Die (Рабочая заготовка/Инструмент), и, как правило, для проведения типового расчета, достаточно оставить значения по умолчанию в этом поле и в поле Finite Volume (Конечные объемы). Число записей также увеличивает потребное машинное время, так как для записи результатов вычислений необходимо использовать не только оперативную память, но и физическое обращение к жесткому диску ЭВМ.

Помимо этих возможностей пользователь может самостоятельно определить размер шага с помощью следующих переключателей:

- 1) Equal division (Равное деление);
- 2) **Process Time %** (Время процесса %);
- 3) **Stroke** (Ход).

Однако, как правило, для проведения моделирования достаточно оставить значение переключателей на поле Equal division (Равное деление) и перейти к следующей закладке, называемой Problem Type (Тип задачи) (рис. 102).

Тип задачи определяется выбором соответствующего значения в поле **Туре (Тип)**:

- 1) **Ореп Die** (Открытая штамповка);
- 2) Closed Die (Закрытая штамповка);
- 3) Forward Extrusion (Прямое выдавливание);
- 4) Backward Extrusion (Обратное выдавливание);
- 5) **Bending** (Гибка);
- 6) **Rolling** (Прокатка).

Мастер УправленияМоделир	ованием	
Stroke Element Size Output Results Type: Open Die	Problem type Solver Optimize C Hot Forging C Cold Forging	
	Advanced	
	ок	Отмена

Рис. 102. Диалог закладки Тип задачи

Тип задачи определяет настройки решателя для учета физических особенностей протекания вышеперечисленных технологических процессов ОМД. Для выполнения более точного расчета и влияния температуры при реализации рассматриваемых процессов здесь же существует переключатель Hot Forging (Горячая штамповка)/(Cold Forging (Холодная штамповка), который пользователь устанавливает в соответствующее положение в зависимости от температуры предварительного нагрева заготовки.

Помимо этого эта закладка содержит дополнительные опции настройки решателя, которые вызываются щелчком по кнопке Advanced (Настройка) и открывают диалог, показанный на рис. 103.

RET		Boosting		
Swap Type	Nominal	Option	Hug. Ela	stic Limit (H.E.L 💌
Finite Volume Ratio	0.5	Mass	1	-
Swap after	10 Cycles	Time	0	-
Swap after Minimum Fold	0 % Stroke		0	-
CXCX 07		HEL	2	_
Solver	· ···· ··· ··· ··· ··· ··· ··· ··· ···	Time Ramp-Up	0	% Stroke
C Default Solver		Time Ramp-Down	0	% Stroke
 Higher Order So Maximum 	olver 6	Multi-Stage		
Output Params		Contact		
Max. Distance to Die	25.4 m	m Robust Contact	Check (3D)	

Рис. 103. Диалог опции Advanced (Настройка)

Эти опции также определяют скорость расчета, позволяют оптимизировать результаты и выполнить сглаживание получаемых графиков. И, как правило, для выполнения типовых расчетов, здесь достаточно оставлять значения по умолчанию.

Переход в последнюю закладку Solver Optimize (Оптимизация решения) осуществляется после щелчка по кнопке

и выбора соответствующей закладки в Мастере Управления Моделированием (рис. 104).

Property Time % (eq. 0.100.5)	Process Time %	FV size (mm)	Coarsen	Solution
	Initial=0	0.75	- 1	Default
WP FV size				
0 mm				
Coarsen WorkPiece				
Settings				
Solution:	-			
Default 💌				
	-			

Рис. 104. Диалог Solver Optimize (Оптимизация решения)

Оптимизация решения предполагает разбиение процесса на несколько этапов. На каждом этапе эта опция позволяет задавать той или иной размер элемента сетки, как показано ниже (табл. №9)

Табл. №9

Зависимость размера элемента от времени			
Process Time % (Время	FV size (mm) (Размер объемно-		
процесса %)	го элемента, мм)		
10	10		
20	8		
30	5		
40	3		
50	1		

Зависимость размера элемента от времени

Оптимизация процесса моделирования достигается за счет использования на более ранних этапах более крупной расчетной сетки конечных объемов, что позволяет выполнять эти этапы значительно быстрее, чем без использования этой возможности. На каждом определенном пользователем этапе происходит перестроение сетки конечных объемов, о чем сообщается в строке состояния и последующее возобновление процесса моделирования.

Этапы перестроения сетки будут также отображены при построении графиков различных функций в виде характерных пиковых изменений значений, которые при возобновлении процесса моделирования аппроксимируются линейной функцией и на точность расчета практически не оказывают никакого влияния.

Завершение этапа подготовки задачи осуществляется после возврата в Мастер Управления Моделированием и выходом из него. После выполнения этого действия в Дереве проектов в соответствующей операции появиться следующий значок (рис. 105).



Рис. 105. Дерево процессов по окончанию подготовки данных

Для запуска моделирования необходимо в Дереве процессов выбрать поле Forming (Формовка) и воспользоваться ин-

струментом запуска задачи на расчет **Ш** панели **Моделиро**вание (рис. 106).



Рис. 106. Панель инструментов Моделирование

Для остановки выполнения текущего расчета достаточно щелкнуть кнопку Остановка расчета

Продолжить расчет после его завершения поможет инструмент **Перезапуск моделирования** , команда вызова которого появляется сразу же после завершения остановки расчета.

При возникновении критических ситуаций и аварийных выходов из приложения, продолжение расчета не всегда становится возможным.

В этом случае необходимо очистить директорию запуска щелчком по кнопке и заново поставить задачу на расчет.

4.3.4. Обработка результатов моделирования

Обработка результатов выполненного моделирования технологического процесса ОМД является важнейшим этапом проведения процесса моделирования. И все опции постпроцессора программы MSC.SuperForge представлены на панели инструментов Результаты (рис. 107).



Рис. 107. Панель инструментов Результаты

Все полученные в ходе расчета результаты представлены по следующим категориям:

- 1) Forming (Формовка);
- 2) Die Stress (Напряженное состояние на инструменте);
- 3) Forming XL (Расширенные по формовке);

4) Die Stress XL (Расширенные по напряженному состоянию инструмента).

Для данных по заготовке при анализе формовочных операций можно выделить одинаковый ряд типов выводимых параметров, характерных для операций Forming (Формовка) и Forming XL(Расширенные данные по формовке) (см. табл. №10).

Табл. №10

Сравнительный анализ категорий Forming и Forming XL

N⁰	Имя	Фор- мовка	Расширенные данные по формовке
1	Усилие по Х	Нет	Дa
2	Усилие по Ү	Нет	Дa
3	Усилие по Z	Нет	Дa
4	Температура	Да	Дa
5	Износ	Нет	Дa
6	Зоны контакта	Да	Дa
7	Скорость по Х	Нет	Дa
8	Скорость по Ү	Нет	Дa
9	Скорость по Z	Нет	Дa
10	Напряжения по Х	Нет	Дa
11	Напряжения по Ү	Нет	Дa
12	Напряжения по Z	Нет	Дa
13	Напряжения по ХҮ	Нет	Дa
14	Напряжения по YZ	Нет	Дa
15	Напряжения по ZX	Нет	Дa
16	Плотность элементов	Нет	Дa
17	Эффективные пластические	Да	Дa
	напряжения		
18	Эффективные напряжения	Да	Дa
18	Главные напряжения	Нет	Дa
19	Концентрация напряжений	Нет	Дa

Окончание таблицы №10

N⁰	Имя	Фор- мовка	Расширенные данные по фор-
20	Максимальные напряжения	Нет	Да
21	Минимальные напряжения	Нет	Дa
22	Разрушение – абсолютное	Нет	Дa
23	Разрушение – критический уровень	Нет	Дa
24	Контактные давления	Дa	Дa
25	Нормальное расстояние	Да	Дa
26	Возможные незаполне- ния/зажимы	Нет	Да
27	Определение карманов	Нет	Дa
28	Течение металла	Дa	Дa
39	Вектора напряжений	Нет	Дa

Для анализа технологических процессов в общем случае достаточно опций категории Forming (Формовка), которые рассмотрим ниже.

Просмотр картины распределения температуры по объему заготовки можно выполнить следующим образом. В Дереве процессов необходимо выбрать объект Wpiece, а в панели инструментов Результаты установить следующие значения (рис. 108).



Рис. 108. Значение категорий панели инструментов Результаты.

Для просмотра поля температуры (в прочем, как и других параметров) при конечном положении инструментов, достаточно щелкнуть по кнопке , результатом чего станет следующее изображение (см. рис. 109).

Просмотреть распределение температуры и формоизменения заготовки позволяют инструменты панели плеера, расположенной в окне пост-процессора (рис. 110).



Рис. 109. Распределение температуры в конце операции





Наиболее интересными функциями этой панели являются функции перемотки назад/вперед, остановки и паузы. В результате картина распределения температурного поля приобретает более естественный вид (рис. 111).

Просмотр остальных параметров осуществляется точно также, с той лишь разницей, что в соответствующих полях панели инструментов Результаты должны стоять соответствующие значения (см. таблицу № 11).



Рис. 111. Изменение распределения температуры во время штамповки

Табл №11

1 40.11. 1211		
Анализируемые данные	Категория	Тип
Контакт инструментов	Forming	Die Contact
Эффективные пластиче-	Forming	Effective Plastic
ские напряжения		Strain
Температура	Forming	Temperature
Распределение напряжений	Forming	Effective Strainrate

Окончание табл. №11

Анализируемые данные	Категория	Тип
Контактные давления	Forming	Contact Pressure
Нормальное расстояние до	Forming	Normal Distance to
инструментов		Die
Течение материала	Forming	Material Flow

Просмотреть распределение этих же параметров внутри заготовки позволяет инструмент Cut selected model (Разрезать выбранную модель) . Работает этот инструмент следующим образом. В том случае, когда возникает необходимость в анализе распределения полей полной модели, то в Дереве проектов необходимо выбрать текущий процесс и нажать на кнопку . результатом чего станет следующий диалог (рис. 112).



Рис. 112. Диалог инструмента Cut selected model (Разрезать выбранную модель)

Положение плоскости сечения можно устанавливать с помощью бегунка Положение, указанием относительного места положения или вводом точного радиуса сечения. Также опции этой команды позволяют создать набор сечений, расположенных на некотором расстоянии друг от друга с возможностью анимированного просмотра.

Помимо визуального анализа процессов в MSC.SuperForge имеется возможность количественного анализа с применением инструментов построения графиков.



Рис. 113. Пример построения графика функции P=f(t)

Также, MSC.SuperForge при соответствующих комбинации параметров пост-процессора позволяет выполнить построение следующих функций (см. таблицу № 12).

N⁰	Аргумент	Функция
1	ход	Усилие по Х
		Усилие по Ү
		Усилие по Z
		центр гравитации по Z
		общая сумма энергии
		общая полезная энергия
		эффективность
2	Время	Усилие по Х
		Усилие по Ү
		Усилие по Z
		центр гравитации по Z
		Усилие по Ү
		Усилие по Z
		центр гравитации по Z
		общая сумма энергии
		общая полезная энергия
		эффективность
3	Приращение шага	Усилие по Х
		Усилие по Ү
		Усилие по Z
		центр гравитации по Z
		общая сумма энергии
		общая полезная энергия
		эффективность

Табл. №12

Вопросы для самоподготовки:

1. Опишите возможности программного комплекса САПР ТП QForm?

2. В чем заключаются особенности постановки задачи при трехмерном анализе?

3. Опишите возможности программного комплекса САПР ТП Deform-3D?

4. В чем заключается отличие метода конечных объемов от метода конечных элементов?

5. Охарактеризуйте возможности возможности программного комплекса САПР ТП MSC.SuperForge(Simufact Forming)?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Новокщенов С.Л., Бойко А.Ю., Гольцев А.М., Антонов С.И. САПР технологических процессов ОМД/Курс лекций/Учебное пособие, Воронеж, ГОУВПО ВГТУ, 2007, 176 с., ил.
- Елисеев В.В., Гольцев А.М., Елизаров Ю.М., Комаров А.Д., Крупин Е.П., Конасов М.А. База данных САПР технологических операций многопереходной листовой штамповки /Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий в инновационных проектах, Москва, Радио и связь, 2006, с. 31-36.
- Рыбаков А.В., Евдокимов С.А., Мелешина Г.А. Создание ние автоматизированных систем в машиностроении: учеб. пособие. М. :Изд-во "Станкин", 2001. 157с.
- 4. Бреббия К. Методы граничных элементов. / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. -М.: Мир, 1987. — 524 с.
- Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. — 392 С.
- 6. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984
- Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике М.: Мир, 1975.
- Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986
- Деклу Ж. Метод конечных элементов: Пер. с франц. М.: Мир, 1976
- 10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.

- 11. Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. Математеическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб, Изд-во СПбГПУ: 2004
- ASM Hanbook. Vol. 22B. Metals Process Simulation, ASM International, 2010
- 13. J.M. Cabrera, A. Al Omar, J.M. Prado. Simulación de la fluencia en caliente de un acero microaleado con un contenido medio de carbono. II parte. Recristalización dinámica: inicio y cinética. Rev. Metal Madrid, 33 (3), 1997, pp. 143-152
- 14. Ю.М. Чижиков Моделирование процесса прокатки, М: Металлургиздат, 1963
- 15. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1976. — 280 с.
- 16. Лунев В.А. Математическое моделирование и планирование эксперимента [Электронный ресурс] <URL:http://dl.unilib.neva.ru/dl/2691.pdf>.
- Григорьев А.К., Коджаспиров Г.Е. Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве. Л.: Машиностроение, 1985. — 143 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ САПР
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ7
1.1. Историческое развитие и наследие7
1.2. Современное состояние и опыт применения14
1.3. Перспективы развития САПР ТП19
Вопросы для самоподготовки:
ГЛАВА 2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ, СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
И ФУНКЦИОНАЛ МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
2.1. Структура и взаимосвязь программных модулей САПР ТП
ОМД21
2.2 Природа и механизм пластической деформации и
разрушения металла
2.3 Характерные особенности современных методов
расчета
2.4. Физическое моделирование с применением пластометов.49
2.5. Физическое моделирование с применением теорем
подобия
2.6. Статистические модели
2.7. Моделирование с помощью нейросетей53
Вопросы для самоподготовки:
ГЛАВА З МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В САПР
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
3.1 Плоское напряженно-деформированное состояние56

3.2 Осесимметричное напряженно-деформированное
состояние
3.3 Объемное напряженно-деформированное состояние63
3.4 Законы сохранения65
3.5 Зависимости механики континуума в матричном
представлении
3.6 Деформации70
3.7 Течение. Скорости деформации80
3.8. Сопротивление металла деформированию при комнатной и
пониженной температурах81
Вопросы для самоподготовки:
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В САПР ТП83
4.1. Решение задач моделирования технологических процессов
обработки металлов давлением в двумерной постановке в
программе QForm-2D83
4.1.1. Классификация исходных данных
4.1.2. Методика быстрой подготовки геометрических данных86
4.1.3. Выполнение расчета94
4.1.4. Просмотр результатов
4.2. Методика работы в современном САПР ТП ОМД.
Пре-процессор системы Deform-3D101
4.2.1. Сохранение Проблемы111
4.2.2. Выход из Deform-3D111
4.2.3. Открытие предварительно сохраненной проблемы111
4.2.4. Импортирование инструментов112
4.2.5. Вставка инструментов
4.2.5.1. Верхний инструмент112
4.2.5.2. Нижний инструмент115
Учебное издание

Новокщёнов Сергей Леонидович Демидов Алексей Владимирович Корнеев Валерий Иванович

САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В авторской редакции Компьютерный набор С. Л. Новокщёнова

Подписано к изданию 15.12.2015. Объем данных 7,0 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394026 Воронеж, Московский просп., 14