

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

**Моделирование
и автоматизированное проектирование
технологических процессов
обработки металлов давлением**

Учебное пособие

2-е издание, дополненное и переработанное

Красноярск
СФУ
2019

УДК 621.7.04(07)
ББК 30.612я73
М744

Коллектив авторов:

С.Б. Сидельников, И.Н. Довженко, И.Ю. Губанов, Р.Е. Соколов, Н.Н. Довженко, Э.А. Рудницкий, Р.И. Галиев, В.Н. Беспалов, И.Н. Белоконова

Рецензенты:

А.В. Коновалов, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики деформаций Института машиноведения УрО РАН;

А.Р. Фастыковский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и металловедения Сибирского государственного индустриального университета

М744

Моделирование и автоматизированное проектирование технологических процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие / С.Б. Сидельников, И.Н. Довженко, И.Ю. Губанов [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. – 252 с. ISBN 978-5-7638-4079-7

Изложены основные методологические принципы и сведения для освоения курсов дисциплин по моделированию и разработке систем автоматизированного проектирования процессов обработки металлов давлением. Представлены краткие теоретические и технологические аспекты построения алгоритмов расчета конкретных задач САПР. Рассмотрены примеры использования различных САПР для проектирования инструмента и технологии процессов ОМД. Даны контрольные задания для выполнения практической и самостоятельной работы студентов.

Предназначено для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.7.04(07)
ББК 30.612я73

ISBN 978-5-7638-4079-7

© Сибирский федеральный университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование и автоматизированное проектирование процессов обработки металлов давлением используется при обучении студентов направления «Металлургия» для уровней подготовки бакалавров и магистров. Материалы данного учебного пособия используются в таких дисциплинах учебных планов, как «Информационные технологии в металлургии», «Математические методы в автоматизированном проектировании», «Моделирование и оптимизация технологических процессов», «Моделирование процессов и объектов в металлургии», «САПР процессов ОМД», «САПР процессов КШП» и др., что позволяет освоить основные операции обработки металлов давлением.

Для этого в книге последовательно приводятся методики и средства для математического моделирования процессов обработки металлов давлением на ЭВМ, основы построения математических моделей и алгоритмы расчета основных параметров формоизменения и энергосиловых характеристик этих процессов. Для их расчета и выбора соответствующего оборудования используют разработанные ранее методики, изложенные в учебниках, учебных пособиях и монографиях [1–10].

Немаловажным этапом в обучении студентов является разработка комплексного программного обеспечения в виде подсистем и систем автоматизированного проектирования (САПР). Здесь необходимо знание современных языков программирования, баз данных, стандартного программного обеспечения и др. Необходимо отметить, что приведенные в учебном пособии системы автоматизированного проектирования были разработаны при непосредственном участии студентов и используются не только в учебном процессе, но и научных исследованиях. Акцент при этом был сделан на создание прикладных программных средств, внедренных на конкретных технологических производствах.

Универсальность предложенных в пособии задач позволяет студентам, воспользовавшись приведенными алгоритмами, выполнить индивидуальную комплексную работу в виде программы расчетов на ЭВМ или раздел выпускной квалификационной работы.

Первое издание пособия [1] использовалось в течение ряда лет при обучении студентов на кафедрах обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Настоящее издание дополнено практическими заданиями по моделированию процессов обработки металлов давлением (ОМД) с помощью различных программных комплексов, таких как MathCAD, Ansys и LS-Dyna, Solid Works, Deform и др., а также материалами для практических и лабораторных занятий на ЭВМ по моделированию (гл. 4) и проектированию (гл. 5) процессов обработки металлов давлением с примерами использования перечисленных выше программных комплексов.

Глава 1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОМД НА ЭВМ

1.1. Содержание программы обучения по моделированию и проектированию технологических процессов обработки металлов давлением

В соответствии с требованиями государственного стандарта студент должен владеть навыками работы на современной вычислительной технике, знать и уметь пользоваться стандартными пакетами прикладных программ, разрабатывать авторские программные средства, непосредственно связанные со спецификой изучаемых дисциплин.

Для выполнения этих требований необходимо изучение комплексного курса, объединяющего в себе элементы программирования, вычислительной техники, моделирования, теории и технологии обработки металлов давлением. Таким образом, изложенные ниже основы моделирования и проектирования процессов обработки металлов давлением (ОМД) необходимы студентам для получения навыков работы на персональных компьютерах с использованием знаний основ теории и технологии обработки металлов давлением.

В результате студенты должны получить определенные компетенции: готовность использовать базы данных, пакеты прикладных программ и средства компьютерной графики для решения профессиональных задач; автоматизированные системы проектирования; способность на основе системного подхода строить модели для описания и прогнозирования явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ с оценкой пределов применимости полученных результатов.

Процесс обучения студентов разбит на три этапа, при этом последовательно знания и навыки, полученные в ходе изучения специ-

альных дисциплин, используются для создания авторского программного продукта. Основной акцент сделан на самостоятельную подготовку, результаты которой оценивают на практических занятиях под руководством преподавателя. Конкретным содержанием практических занятий по данному курсу является выполнение следующих видов работ.

На первом этапе обучения необходимо закрепление основ программирования на современных языках и навыков работы на ЭВМ; выполнение аналитического обзора разделов учебно-технической литературы, освещающего непосредственно выбранный технологический процесс; создание подробной демонстрационной схемы процесса работы основного оборудования (прокатного стана, прессы, волочильного стана) при осуществлении заданной операции; реализация на одном из языков программирования файла, отражающего статическую демонстрационную схему заданной технологической операции; совершенствование программного файла с отображением динамики заданного процесса и схемы пластического формоизменения обрабатываемого материала, в том числе и с применением пакетов типа Deform и др.

На втором этапе обучения выполняется разработка динамической модели с возможностью изменения входных параметров процесса; проводится закрепление основ программирования на современных языках и навыков работы на ЭВМ; осуществляется совершенствование программы с отображением динамики и последовательности формоизменения металла на базе знаний, полученных по специальным дисциплинам; создаются окна диалогового ввода основных технологических характеристик процесса и технических характеристик основного оборудования и обрабатываемого материала, а также подготавливается программный файл к переходу от демонстрационной модели к диалоговому режиму работы программы с блоком расчета и занесением в него формул по определению основных технологических параметров процесса; реализуется подробная графическая разработка и проверочные расчеты одного из основных узлов выбранного технологического оборудования и формируется программа ввода-вывода основных технологических характеристик и расчета формоизменения металла и энергосиловых параметров процесса.

Третий этап обучения связан с подготовкой выпускной квалификационной работы. Здесь проводится разработка подробной технологической схемы производства по заданию с общим кратким описанием основных характеристик технологических операций (без зада-

ния конкретных выходных и входных данных по продукции); создание базы данных по механическим свойствам металлов и сплавов; по выбору оборудования; конкретизация на основе полученных знаний по технологическим дисциплинам подробной технологической схемы производства и расчет на ЭВМ характеристик технологических операций по получению той или иной продукции с привязкой разработанных программных средств к выпускной работе; подготовка рабочих чертежей и графической части технологической карты с помощью любой системы проектирования и подготовки конструкторской документации, например AutoCAD. В случае применения (или разработки) средств автоматизированного проектирования процессов ОМД используют авторские программные средства (гл. 2, 3).

Приведем типовые тематические задания для выполнения выпускной работы.

1. Прокатка листов из сталей на двухвалковом прокатном стане.
2. Прокатка листов из цветных металлов и сплавов на двухвалковом прокатном стане.
3. Прокатка полос из сталей на четырехвалковом прокатном стане.
4. Прокатка полос цветных металлов и сплавов на четырехвалковом прокатном стане.
5. Прокатка тонких листов и лент на многовалковом прокатном стане.
6. Прокатка простых сортовых профилей из черных металлов.
7. Прокатка простых сортовых профилей из цветных металлов.
8. Волочение прутков и проволоки.
9. Безоправочное волочение труб.
10. Волочение труб на плавающей оправке.
11. Прессование прутков на горизонтальном гидравлическом прессе с прямым истечением металла.
12. Прессование труб на прессах с прошивной системой.
13. Прессование труб через комбинированную матрицу.
14. Прессование полых профилей через комбинированную матрицу.
15. Прессование прутков и профилей из медных сплавов с использованием скальпирующего устройства.
16. Многоочковое прессование прутков.
17. Многоочковое прессование профилей.
18. Прессование прутков с использованием форкамерного инструмента.
19. Полунепрерывное прессование профилей с применением форкамерного инструмента.

20. Прессование на горизонтальном гидравлическом прессе с обратным истечением металла.

21. Непрерывное прессование по методу «Конформ».

22. Совмещенная прокатка-прессование.

23. Непрерывное прессование по методу «Лайнекс».

24. Сортная прокатка фасонных профилей.

25. Прокатка-волочение.

26. Резка листового металла ножницами.

27. Вырубка.

28. Раскрой листов.

29. Раскрой лент и полос.

30. Вытяжка осесимметричных деталей без утонения стенок.

31. Вытяжка деталей коробчатой формы.

32. Вытяжка осесимметричных деталей с утонением стенок.

33. Гибка V-образных деталей.

34. Гибка П-образных деталей.

35. Отбортовка.

36. Рельефная формовка.

37. Обжим.

38. Раздача.

39. Осадка.

40. Высадка поковок.

41. Протяжка бруса прямоугольного сечения.

42. Протяжка круглой заготовки в вырезных бойках.

43. Открытая прошивка.

44. Закрытая прошивка.

45. Вальцовка.

46. Раскатка колец.

47. Штамповка в открытых штампах.

48. Штамповка в закрытых штампах.

49. Штамповка выдавливанием.

50. Резка заготовок на кривошипных пресс-ножницах.

Следует отметить, что студент вправе предложить свою тему работы, которая ведет к созданию новой модели перспективного процесса ОМД, например, процесса непрерывного литья и прокатки, магнитоимпульсной штамповки и т. д.

1.2. Основные понятия и содержание автоматизированного проектирования

Проектирование технического объекта [11] – процесс создания, преобразования и представления в принятой форме образа (т. е. проекта) еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами во время взаимодействия человека и ЭВМ. В любом случае инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности общества в некоторых технических объектах (строительства, промышленные изделия или процессы). Проектирование включает в себя разработку технического предложения и (или) технического задания (ТЗ), отражающих данные потребности, и реализацию ТЗ в виде проектной документации, содержащей достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть проект, точнее, окончательное описание объекта.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека и ЭВМ, называют *автоматизированным*, в отличие от ручного (без использования ЭВМ), или автоматическим (без участия человека на промежуточных этапах).

Анализ современного производства показывает, что с непрерывным усложнением современных технических объектов повышаются требования к их надежности, качеству и технико-экономическим показателям. Долгая разработка проектов приводит к моральному старению технических решений, что требует сокращения сроков разработки, уменьшения трудоемкости, стоимости и повышения эффективности труда инженеров-проектировщиков, конструкторов и технологов. Переход от ручного к автоматизированному проектированию и нацелен на решение описанных выше проблем.

Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой *систему автоматизированного проектирования* (в англоязычном написании CAD System – Computer Aided Design System) [11].

Проектирование сложных объектов основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде теорий и подходов. Наиболее общий – *системный подход*, идеями которого пронизаны различные методики проектирования сложных систем. Основной принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей процесса или сложной системы с учетом их взаимодействия. Системный подход

включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение атрибутов, анализ влияния внешней среды.

Системы автоматизированного проектирования относятся к числу наиболее сложных современных искусственных систем. Их проектирование и сопровождение невозможны без системного подхода. Поэтому идеи и положения системного подхода входят составной частью в дисциплины, посвященные изучению современных автоматизированных систем и технологий их применения.

Интерпретация и конкретизация системного подхода имеют место в ряде известных подходов с другими названиями, которые также можно рассматривать как компоненты системного подхода. Таковы структурный, блочно-иерархический, объектно-ориентированный подходы.

При *структурном подходе*, как разновидности системного, требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их выборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции сложных описаний объектов и, соответственно, средств их создания на иерархических уровнях и аспектах, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

Ряд важных структурных принципов, используемых при разработке информационных систем и, прежде всего, их программного обеспечения (ПО), выражен в *объектно-ориентированном подходе* к проектированию (ООП). Такой подход имеет преимущества в решении проблем управления сложностью и интеграции ПО:

- вносит в модели приложений большую структурную определенность, распределяя представленные в приложении данные и процедуры между классами объектов;
- сокращает объем спецификаций, благодаря введению в описания иерархии объектов и отношений наследования между свойствами объектов разных уровней иерархии;
- уменьшает вероятность искажения данных из-за ошибочных действий за счет ограничения доступа к определенным категориям данных в объектах. Описание в каждом классе объектов допустимых обращений к ним и принятых форматов сообщений облегчает согласование и интеграцию ПО.

Все подходы к проектированию сложных систем имеют свои особенности.

1. *Структуризация* процесса проектирования, выражаемая декомпозицией проектных задач и документации, выделением стадий, этапов, проектных процедур. Эта структуризация является сущностью блочно-иерархического подхода к проектированию.

2. *Итерационный* характер проектирования.

3. *Типизация и унификация* проектных решений и средств проектирования.

САПР в области обработки металлов давлением относят к таким сложным системам, при этом известны работы отечественных и зарубежных ученых [12–18], посвященные определению рациональных технологических режимов и расчету конфигурации инструмента с помощью ЭВМ. В них рассмотрены отдельные аспекты данной задачи (в основном технологического характера). Вместе с тем проблема создания комплексной САПР гораздо многограннее и включает в себя такие вопросы, как построение моделей процесса, организация диалога человека с ЭВМ, создание информационной базы сложной структуры и средств удобного обращения к ней и т. п.

В развитии теории и практики автоматизированного проектирования выделяют две взаимосвязанные тенденции [19; 20]: усложнение объектов проектирования; переход от автоматизации отдельных процедур или этапов проектирования к созданию интегрированных САПР, охватывающих процессы проектирования и изготовления. В связи с этим возникла необходимость рассматривать САПР (и проектируемые с ее помощью изделия) как сложные технические системы, состоящие из разнородных, но взаимосвязанных компонент.

Основой всех подходов к автоматизации процесса проектирования служит тезис о том, что системы автоматизированного проектирования – это организационно-технические системы, основанные на человеко-машинном способе выбора рациональных вариантов решения, которые представляют собой совокупность средств, включающих математическое, техническое, программное, информационное и другое обеспечение [21].

Принято выделять семь видов обеспечения. Техническое (ТО), включающее различные аппаратные средства (ЭВМ, периферийные устройства, сетевое коммутационное оборудование, линии связи, измерительные средства). Математическое (МО), объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования. Программное (ПО), представляемое компьютерными программами САПР. Информационное (ИО), состоящее из баз данных (БД), систем управления базами данных (СУБД), а также других данных,

используемых при проектировании, при этом вся совокупность используемых при проектировании данных называется информационным фондом САПР, а БД вместе с СУБД носит название банка данных (БнД). Лингвистическое (ЛО), выражаемое языками общения между проектировщиками и ЭВМ, языками программирования и языками обмена данными между техническими средствами САПР. Методическое (МетО), включающее различные методики проектирования, иногда к МетО относят также математическое обеспечение. Организационное (ОО), представляемое штатными расписаниями, должностными инструкциями и другими документами, регламентирующими работу проектного предприятия.

При разработке и организации данных видов обеспечения опираются на общие принципы, мало зависящие от специфики проектируемых объектов. Они широко освещены в специальной литературе и нормативно-технической документации. Содержательная суть объектов, для проектирования которых создается САПР, отражается в методическом обеспечении, объединяющем логику процесса проектирования и алгоритмы выполнения проектных процедур и операций, ориентированных на применение ЭВМ. Оно, в свою очередь, включает в себя структурно-параметрическое описание объекта проектирования, математические модели для формализации процедур проектирования, методы и процедуры принятия решений.

Несмотря на большое разнообразие существующих САПР, все они могут быть описаны логической структурой, представляющей четыре взаимосвязанных модуля (рис. 1.1) [22].

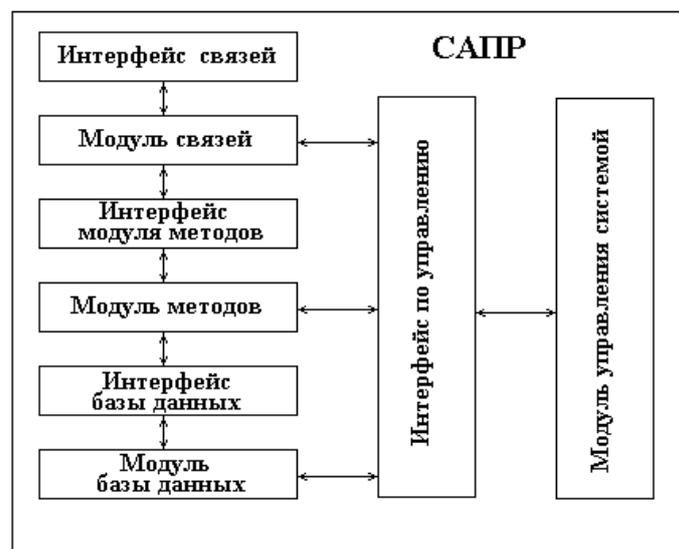


Рис. 1.1. Логическая структура программных средств САПР

Взаимодействие между проектировщиком и САПР обеспечивает *модуль связи*. Он реализует графико-интерактивные функции ввода-вывода и методы предварительной обработки данных. *Модуль методов* реализует алгоритмы, необходимые для выполнения проектных процедур: решение геометрических задач, задач вычислений и т. д. *Модуль базы данных* предназначен для хранения и манипулирования данными через систему управления базой данных, *модуль управления* контролирует и координирует различные режимы системы и обеспечивает сходимость процесса проектирования.

В соответствии с рассмотренной логической структурой отдельные модули взаимодействуют через интерфейсы, что делает средства автоматизированного проектирования более гибкими и эффективными.

1.3. Программное обеспечение, структура и классификация САПР

Как и любая сложная система, САПР состоит из нескольких подсистем [11] (рис. 1.2).

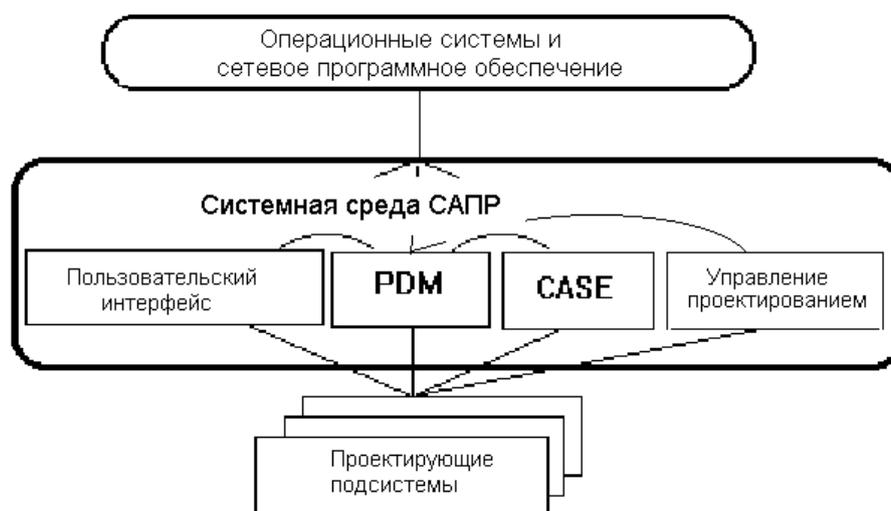


Рис. 1.2. Структура программного обеспечения САПР

Различают подсистемы проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры. К проектирующим относят.

- *CAD-системы (Computer-Aided Design (Drafting))* – компьютерная поддержка проектирования (черчения). Предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской докумен-

тации. Как правило, в современные САД-системы входят модули моделирования трехмерной объемной конструкции (детали) и оформления чертежей и текстовой конструкторской документации (спецификаций, ведомостей и т. д.);

- *САМ-системы (Computer-Aided Manufacturing* – компьютерная поддержка изготовления). Предназначены для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи программ для этих станков (фрезерных, сверлильных, эрозионных, пробивных, токарных, шлифовальных и др.). В САМ-системах используется трехмерная модель детали, созданная в САД-системе;

- *САЕ-системы (Computer-Aided Engineering* – поддержка инженерных расчетов). Представляют собой обширный класс систем, каждая из которых позволяет решать определенную расчетную задачу (группу задач), начиная от расчетов на прочность, анализа и моделирования тепловых процессов до расчетов гидравлических систем и машин, расчетов процессов литья и обработки металлов давлением. В САЕ-системах также используется трехмерная модель изделия, созданная в САД-системе. В свою очередь, САЕ системы подразделяются на системы инженерного анализа для моделирования конструкторских задач и системы инженерного анализа для моделирования технологических процессов;

- *САПП-системы (Computer-Aided Process Planning* – компьютерная поддержка технологической подготовки производства). Системы технологической подготовки производства (САПП ТП), предназначенные для формирования технологических данных об изделии, ведения централизованного архива этой информации и автоматизированного выпуска технологической документации.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПП. Типичными обслуживающими подсистемами являются:

- *PDM-системы (Product Data Management* – управление данными об изделии). Их основным предназначением является управление информацией об изделии (в том числе проектными данными) на протяжении всего его жизненного цикла. При этом в качестве изделий могут рассматриваться различные сложные технические объекты (корабли и суда, самолеты и ракеты, компьютерные сети и др.);

- *DesPM-системы (Design Process Management)*, системы управления процессом проектирования;

- *подсистемы пользовательского интерфейса* для связи разработчиков с ЭВМ;
- *CASE-системы (Computer Aided Software Engineering)* для разработки и сопровождения программного обеспечения САПР;
- *обучающие подсистемы* для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

Программные средства САПР достаточно многообразны, причем выделяют следующие признаки их классификации:

- по назначению (машиностроительные, электротехнические и др.);
- специализации программных средств (узкоспециализированные, универсальные, комплексные и др.);
- поддержке трехмерного моделирования (двух- и трехмерные системы, трехмерные с удалением скрытых линий и др.);
- характеру базовой подсистемы (на базе машинной графики и геометрического моделирования, на базе СУБД и др.);
- возможности обмена информацией (замкнутые системы, системы с текстовыми файлами обмена информацией и др.);
- возможности функционального расширения системы пользователем (закрытые системы, системы с пакетной обработкой команд, системы с возможностью подключения внешних модулей и др.);
- удобству диалога системы с пользователем (с интуитивно простым пользовательским интерфейсом, со сложным интерфейсом и др.).

Однако основной считают классификацию САПР по функциональности систем, при этом все продукты САПР разделены на три класса: тяжелый, средний и легкий (табл. 1.1) [23].

Такая классификация сложилась исторически, и хотя уже давно идут разговоры о том, что грани между классами вот-вот сотрутся, они остаются, поскольку системы по-прежнему различаются и по цене, и по функциональным возможностям.

Главная особенность систем высокого уровня (табл. 1.1) состоит в том, что их обширные функциональные возможности, высокая производительность и стабильность достигнуты в результате длительного развития (все они появились в 1980-х годах).

САПР высокого уровня характеризуются дороговизной лицензии (свыше 10 тыс. долл. на одно рабочее место), поэтому затраты на их приобретение окупаются при производстве сложных технических объектов, например в машиностроении, двигателестроении, авиационной и аэрокосмической промышленности. Каждая «тяжелая» САПР представляет собой конфигурируемый программный пакет, в который

входят множество подсистем (CAD, CAE, CAM, PDM), ориентированных на совместную работу нескольких пользователей.

Таблица 1.1

Виды и классификация САПР

Класс САПР	Продукт	Компания
<i>Тяжелый</i> (САПР высокого уровня)	CATIA Creo Parametric NX (Siemens NX)	Dassault Systemes/IBM PTC (Parametric Technology Corp.) Siemens PLM Software
<i>Средний</i> (САПР среднего уровня)	Зарубежные системы SolidEdge SolidWorks Inventor и Mechanical Desktop Отечественные продукты КОМПАС-3D T-FLEX Sprut ADEM	Siemens PLM Software DS SolidWorks Corporation Autodesk Аскон Топ Системы Спрут-технология группа компаний ADEM
<i>Легкий</i> (САПР нижнего уровня)	AutoCAD SurfCAM 2D DataCAD CADopia TurboCAD	Autodesk Surfware DataCAD CADopia IMSI

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) – одна из самых распространенных САПР высокого уровня, разработанная фирмой Dassault Systemes, S.A. (Франция) [24]. Это комплексная система автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа, включающая в себя передовой инструментарий трёхмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации. Система позволяет эффективно решать задачи технической подготовки производства – от внешнего (концептуального) проектирования до выпуска чертежей, спецификаций, монтажных схем и управляющих программ для станков с ЧПУ.

CATIA широко применяется как в авиационной, так и автомобильной промышленности. За рубежом систему используют на предприятиях Boeing, Chrysler, BMW, Honda, Volvo, FIAT, Peugeot-Citroen,

Renault, Daimler-Benz, Motorola и др. Крупнейшими пользователями САТІА в России являются ГАЗ и АвтоВАЗ.

Многоуровневый и платформный подход к позиционированию системы САТІА позволяет охватить различные отрасли машиностроения – автомобилестроение, авиастроение, общее и транспортное машиностроение, включая железнодорожный транспорт, станкостроение, производство технологического оборудования и оснастки, а также производство товаров народного потребления.

Широкое распространение получила система Creo Parametric (*Pro/ENGINEER*) [25]. Фирма PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (PTC) основана в 1985 году в США русским эмигрантом, доцентом кафедры математики Ленинградского университета Самуилом Гейсбергом. Проработав несколько лет начальником отдела разработок ComputerVision и не найдя отклика на свои идеи по новым принципам построения CAD/CAM-систем, он пришел к выводу, что пора создавать систему нового поколения. Вследствие этого в Pro/ENGINEER были с самого начала заложены фундаментальные принципы, не имеющие аналогов в других системах. Pro/ENGINEER изначально разрабатывалась, в отличие от других систем, с использованием появившейся к тому времени технологии объектно-ориентированного программирования (языки программирования C++ и ADA), что позволило реализовать ряд уникальных концепций самой CAD/CAM-системы и на базе Pro/ENGINEER определить совершенно новые подходы к разработке изделий.

Система Pro/ENGINEER начала свой путь в условиях, когда подавляющее большинство крупных заказчиков уже определились с выбором CAD/CAM-системы. Такие крупнейшие корпорации, как GM, Boeing, BMW, Ford и другие уже использовали и даже стандартизировали одну из систем верхнего уровня. Тем не менее новая, революционная технология твердотельного параметрического моделирования в сочетании с безупречно продуманной архитектурой системы, позволяющей построить действительно сквозную цепочку от проектирования до производства, нашла свое применение.

Крупнейшими пользователями Creo Parametric являются РКК «Энергия», СПУРТ, ДНПП, «ЭЛАРА», АНТК им. А.Н. Туполева, Raytheon, Lockheed Martin, Harley-Davidson, Intel, Siemens, Motorola, ABB, Caterpillar.

Так же как и система САТІА, САПР Creo Parametric (Pro/ENGINEER) состоит из нескольких модулей. Ядром линейки продуктов для решения спектра задач по проектированию деталей и сборок,

генерации рабочих чертежей и спецификаций, обмена геометрической информацией между различными приложениями служит модуль Pro/ENGINEER Foundation Advantage. В состав базового пакета входят следующие дополнительные возможности:

- Mechanism Design – пакет моделирования поведения механизма;
- ModelCHECK – пакет контроля качества проектирования и подготовки документации;
- Import Data Doctor – пакет развитых средств корректирования и редактирования геометрии, импортированной из других CAD/CAM систем;
- Design Animation – пакет создания и визуализации анимационных роликов;
- Assembly Performance Extension – пакет оптимизации работы со сложными сборками.

В системе заложены средства трехмерного моделирования листовых деталей – стенки, гнутые элементы, пробитые отверстия и пазы, формованные элементы (жалюзи, рельефные ребра и т. д.). Для гнутых изделий предусмотрена генерация разверток с учетом припуска на изгиб (припуск определяется автоматически в зависимости от толщины листа) и автоматическая генерация таблицгиба (последовательность гибочных операций, радиусы, углы и направления сгиба). Предусмотрена возможность преобразования твердотельных моделей в листовые.

Поддерживается обмен данными в следующих форматах: ACIS, Adobe Illustrator, CADD5, CATIA, CDRS, ICEM, I-DEAS, Parasolid, pdf, Pro/PHOTORENDER, CADAM, MEDUSA (3D ASCII), Unigraphics, AutoCAD dxf/dwg, IGES, STEP (AP202, AP203, AP214), set, vda, ECAD (IDS 2.0, 3.0). cgm, COSMOS/M, PATRAN, SUPERTAB, sla, cgm (MILSPEC MIL-D-28003A), jpect, toff, ProductView, RENDER, stl, vrml, INVENTOR, STHEMO/PRO.

Реализованы средства создания web-публикаций с автоматической генерацией HTML-страниц с использованием Java-апплетов.

На основе как геометрических, так и негеометрических параметров модели поддерживается создание динамически обновляющихся табличных отчетов (ведомостей, спецификаций, технологических карт).

Поддерживается создание фотореалистичных изображений на основе созданных трехмерных моделей с помощью механизма трассировки (ray tracing) созданной сцены с использованием различных источников света, наложения текстур, свойств материала (прозрачность, зеркальность) и т. д.

В Creo Parametric введено более 490 улучшений, связанных с оптимизацией работы пользователей и повышением производительности. Функция «Свободное моделирование» позволяет создавать более совершенные поверхности с большим количеством деталей. Режим «Сечение» – режим обнаружения неточностей, помогает полностью представить конструкцию, возможные изменения и выявить потенциальные проблемы на ранних стадиях разработки. Инструмент «Отслеживание изменений» – просматривать, принимать или отклонять изменения модели, сделанные другими пользователями в Creo Direct (приложения для прямого моделирования).

NX (ранее Unigraphics NX) [26] – система высокого уровня, предназначенная для решения всего комплекса задач, стоящих перед инженерами на всех этапах создания сложных технических изделий (предварительное проектирование, этап инженерного анализа и оптимизации конструкции, изготовление). По всему миру NX широко используется в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, общем машиностроении, производстве бытовой техники, игрушек, медицинских инструментов. Рабочее место представляет собой набор модулей, каждый из которых отвечает за определенные функции. Это позволяет составить оптимальный набор для решения задач дизайнера, конструктора, прочниста, технолога.

Первоначально система носила название «Unigraphics» и была разработана американской компанией United Computing. Многие решения, являющиеся стандартом для современных систем высшего уровня, впервые были представлены в этой системе.

В настоящее время система NX – универсальная интегрированная система автоматизации проектирования производства. Она широко используется в аэрокосмической, автомобильной, машиностроительной, медицинской и многих других отраслях промышленности, производящих высокотехнологичную и наукоемкую продукцию.

Одним из отличий NX от других продуктов на рынке САПР-систем является возможность применения на предприятии технологии KDA (Knowledge Driven Automation – автоматизация с использованием базы знаний). Предлагаемое решение позволяет объединить в единой системе процессы проектирования и знания, накопленные специалистами предприятия. Использование NX и технологии KDA помогает избежать потери неопределимого опыта проектирования продукции на этих предприятиях.

В основе мощнейших функций гибридного твердотельного моделирования лежит ядро Parasolid. Благодаря чему в системе высшего

уровня NX и системе среднего уровня Solid Edge можно не только обмениваться геометрическими данными с абсолютной точностью, но и поддерживать реальную ассоциативную связь между компонентами сборок, детали которых созданы в различных системах. Это позволяет создать многоуровневую структуру САПР на предприятии, применяя различные системы для решения оптимальных задач, добиваясь максимальной эффективности проектирования.

Поддерживается обмен данными в следующих форматах – prt, fem, sim, afm, udf, par, asm, psm, pwd, plm, xml, bkm, xpk, jt, igs, iges, stp, step, dxf, dwg, model, catpart, catproduct, x_t, x_b, xmt_txt, xmt_bin, sldprt, sldasm, cgm, prt(ProE), asm(ProE), vrm, stl.

Использование мастер-процессов, специфичных для конкретных областей инженерной деятельности, дает огромный эффект за счет аккумуляции знаний о процессах в виде логической последовательности действий с определенными параметрами. Яркими примерами реализации мастер-процессов в NX являются модули Progressive Die Wizard (модуль проектирования штампов последовательного действия), Die Engineering и Die Design (модули проектирования штампов и структуры штампов), One Step Formability (одношаговый анализ формуемости для оценки возможности получения листовой детали методом холодной штамповки), позволяющие сократить время проектирования сложных штампов в несколько раз.

Средний класс САПР (см. табл. 1.1) появился относительно недавно – в середине 1990-х годов. К 1995 году вычислительная мощность ПК выросла, что позволило разработчикам создать системы автоматизированного проектирования, которые заняли промежуточное положение между тяжелым и легким классами. Они произвели настоящий переворот в мире САПР, позволив многим конструкторским и проектным организациям перейти с двумерного на трехмерное моделирование. Лидеры этого сегмента – системы SolidEdge (разработанная фирмой Intergraph, а теперь принадлежащая Siemens PLM Software), SolidWorks одноименной компании (в настоящее время – подразделение Dassault Systems), а также Inventor и Mechanical Desktop корпорации Autodesk. В данном сегменте работает множество компаний, в том числе и российских, предлагающих относительно недорогие системы стоимостью порядка 5–8 тыс. долл. на одно рабочее место. Их популярность среди пользователей постоянно растет, и благодаря этому данная область очень динамично развивается.

Таблица 1.2

Проектируемые конструкции штампов ХЛШ

Модели конструкции штампа	Выполняемые операции	Типовые конструкции штампов
1. Разделительные		
1.1. Совмещенные	Вырубка-пробивка	С круглым пакетом, с прямоугольным
1.2. Последовательные с жестким съемником		
1.2.1. Закрытые	Вырубка	С одним ножом, с шаговым упором
	Пробивка-вырубка	С одним ножом, с двумя ножами, с шаговым упором
	Пробивка-отрезка	С одним ножом, с двумя ножами, с шаговым упором
1.2.2. Полузакрытые	Вырубка Пробивка-вырубка Пробивка-отрезка	С одним ножом, с одним ножом, с одним ножом
2. Комбинированные		
2.1. Последовательные с жестким съемником		
2.1.1. Закрытые	Пробивка-отрезка-гибка	С одним ножом, с двумя ножами, с шаговым упором
2.1.2. Полузакрытые	Пробивка-отрезка-гибка	С одним ножом
2.2. Вытяжные для прессов простого действия и для цилиндрических стаканов с фланцем и без фланца	Вырубка-вытяжка Вырубка-вытяжка-пробивка Вырубка-вытяжка-обрезка фланца	С цельной матрицей и пуансоном
3. Формообразующие		
3.1. Вытяжные для прессов простого действия	Вытяжка	С цельной матрицей и пуансоном
3.2. Вытяжные для прессов двойного действия	Вытяжка	С цельной матрицей и пуансоном, с секционной матрицей и пуансоном

Отечественные САПР, такие как T-FLEX, КОМПАС-3D, SPRUT, ADEM, не уступают по своей функциональности системам среднего уровня зарубежных производителей. Типичным представителем такой САПР является T-FLEX компании «Топ Системы» [27], которая слу-

жит для проектирования разделительных, формообразующих и комбинированных штампов холодной листовой штамповки (ХЛШ), предназначенных для получения деталей произвольной конфигурации из различных материалов толщиной до 10 мм и габаритами до 1 000 мм (табл. 1.2).

Рассмотрим подробнее ее подсистему T-FLEX/Штампы для решения задач проектирования листоштамповочного инструмента и технологии. T-FLEX/Штампы (далее T-FLEX) – это профессиональная система автоматизации процесса проектирования штампов для холодной листовой штамповки. Система предназначена для специалистов в данной предметной области и ориентирована на совмещенное проектирование основного объекта и технологической оснастки для его изготовления.

Работа конструктора в системе T-FLEX строится по принципу «смотри и выбирай», то есть процесс проектирования сводится к заполнению или редактированию содержимого полей экранных форм, выбору элементов из таблицы и работе с параметрическими чертежами. Помимо чисто конструкторских задач в системе T-FLEX решаются и технологические вопросы, связанные с проектированием штампов: проверка штампуемой детали на технологичность, получение оптимального однорядного и двухрядного раскроя, расчет развертки гнутой детали, расчет количества переходов и размеров полуфабрикатов при вытяжке осесимметричных деталей и др. Исходными данными для проектирования штампа в системе T-FLEX являются: чертеж штампуемой детали, созданный в T-FLEX CAD или импортированный из других графических систем; толщина и марка материала из предлагаемой базы данных (более 200 материалов); сведения для заполнения основной надписи чертежа (обозначение штампа, обозначение детали, фамилия конструктора, разработавшего чертеж, фамилия нормо-технического контролера, утвердившего разработку и т. д.). Система T-FLEX предлагает пользователю три варианта проектирования штампов.

1. Для проектирования используется прототип, или «базовая модель», на основе имеющихся разработок. Прототип включает в себя различные варианты компоновки, присущие данной конструкции штампа. Изменяя прототип, пользователь может легко привязать конструкцию штампа к особенностям конкретного производства как по конфигурации деталей, так и по их составу. Список решений, предлагаемых системой, постоянно пополняется.

2. Конструктору предлагается самостоятельно сформировать оригинальную структуру проектируемого штампа из формализован-

ных в компьютерном виде деталей и узлов. Эти детали и узлы присутствуют в библиотеке прототипов как самостоятельные изделия (со всеми необходимыми чертежами и фрагментами). База изделий содержит более 100 объектов и открыта для пополнения специалистами предприятия. Для проектирования штампа по сформированной оригинальной структуре от пользователя требуется согласовать входные и выходные параметры выбранных деталей и узлов. Эта работа не требует специальных навыков программиста и может быть выполнена всего за 2 часа. После завершения проектирования оригинальная конструкция становится типовой и в дальнейшем может использоваться для работы по первому варианту.

3. Проектирование в режиме «свободного черчения» в T-FLEX CAD. Полученные в результате чертежи оригинальных конструкций штампов, а также отдельных деталей и узлов могут в дальнейшем использоваться при проектировании по первому или второму вариантам.

Практика показывает, что проектирование штампа по первому варианту с оформлением всей конструкторской документации обычно занимает не более 3 часов в зависимости от сложности штампуемой детали. Этот вариант проектирования охватывает 15–20 % номенклатуры выпускаемых штампов. Второй вариант охватывает 65–70 % номенклатуры проектируемых штампов и требует от разработчика временных затрат от 5 до 15 часов. Это обеспечивается за счет использования в системе T-FLEX сведений более чем из 200 ГОСТ, ОСТ, РТМ и справочников по штамповке. Третий вариант проектирования охватывает 10–15 % номенклатуры, но временные затраты здесь могут составлять от трех до десяти дней. Базовые прототипы, используемые для первого варианта проектирования, постоянно накапливаются за счет выполнения проектирования по второму и третьему варианту.

Результат работы конструктора с системой T-FLEX – полный комплект конструкторской документации, включающий эскиз штампуемой детали, карту раскроя, сборочные чертежи и спецификации к ним, чертежи деталей (в том числе и стандартных) штампа (рис. 1.3). Следует отметить, что контуры рабочих деталей штампа с исполнительными и посадочными размерами (матрица, пуансоны, съемник, пуансонодержатель и т. д.) генерируются автоматически и в виде фрагментов проявляются на требуемых чертежах в рассчитанных точках привязки. Таким образом, окончательное оформление необходимых чертежей сводится к редактированию расположения видов, размерных линий, знаков шероховатости, надписей и т. д.

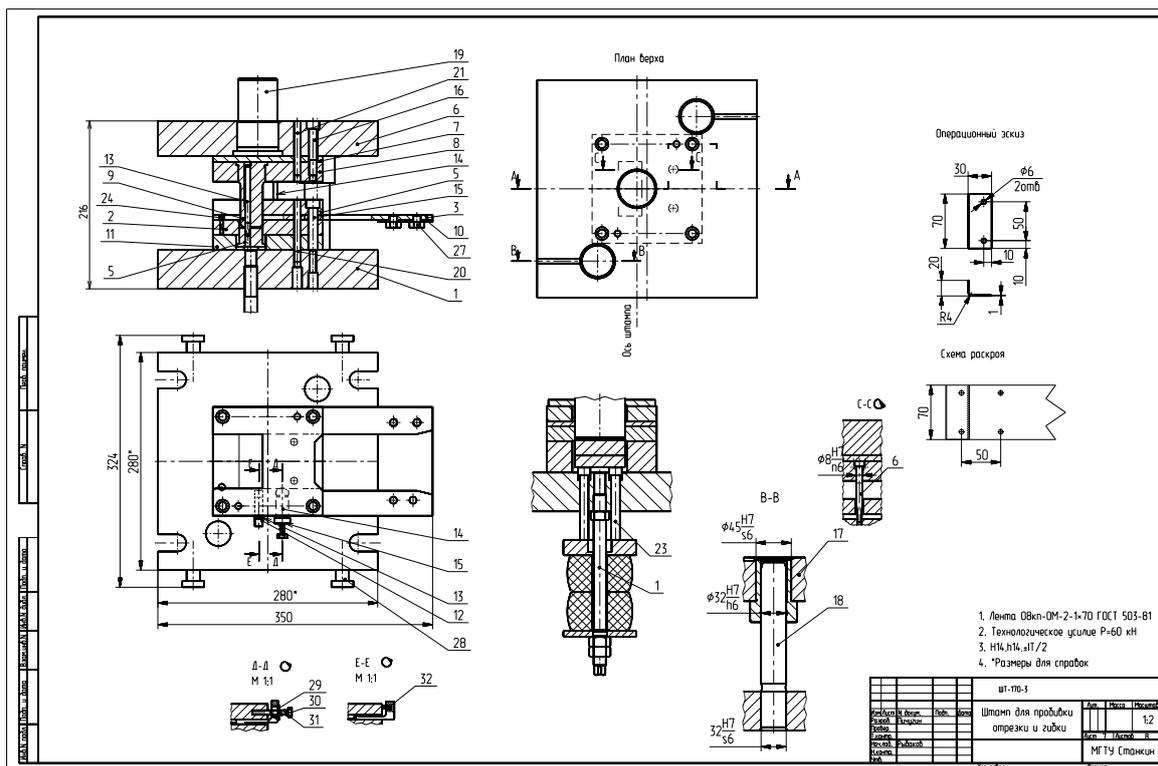


Рис. 1.3. Чертеж штампа в системе T-Flex

Использование T-FLEX обеспечивает максимальный охват номенклатуры деталей для ХЛШ; повышение качества проектных работ за счет сокращения ошибок проектирования; значительное сокращение сроков подготовки технической документации; совмещенное проектирование основного объекта и технологической оснастки для его изготовления; пополнение базы деталей, узлов и конструкций штампов ХЛШ для решения оригинальных задач.

Система T-FLEX/Штампы предназначена для работы в среде Windows и требует дополнительной установки T-FLEX CAD 2D [28].

Несколько иной подход к решению задач проектирования инструмента предлагает система КОМПАС в подсистеме «Штампы-3D». Комплекс программных средств «Штампы-3D» включает в себя систему автоматизированного проектирования штампов и параметрические библиотеки конструктора штампов. С помощью системы возможно проектирование штампов любых конструкций для различных операций холодной листовой штамповки (вырубка, пробивка, гибка, отбортовка, вытяжка и т. д.).

С помощью библиотек проектирования в подсистеме «Штампы-3D» решаются следующие задачи: выполнение технологических расчетов (развертки гнутого профиля, технологических параметров от-

бортовки и вытяжки, усилия штамповки); выполнение технологических и конструкторских построений (заготовок, операционных переходов, схем раскроя полосы при штамповке, рабочей зоны штампа); выполнение конструкторских расчетов параметров и характеристик штампа, технологических систем и деталей (габаритов рабочей зоны, центра давления и закрытой высоты штампа, параметров резинового буфера и пружин в системах съема и прижима, удельного давления на опорную поверхность пуансона, исполнительных размеров рабочих деталей, поверочные расчеты крепежа на срез, и т. п.); проектирование и компоновка элементов конструкции штампа на сборочных чертежах; оформление комплекта конструкторской документации на штамп (сборочных и рабочих чертежей, операционного эскиза, спецификации).

Штамп в этой системе рассматривается как сложная конструкция, которая состоит из набора элементов. В качестве элементов конструкции выступают отдельные детали штампа (пуансон, матрица и т. д.), технологические системы (система крепежа, система фиксации заготовки, система выталкивания детали из зоны формообразования и т. д.), сборочные единицы (блок, пакет, направляющие устройства и т. д.), отдельные конструктивные элементы штампов (например рабочая зона штампа, рабочая часть пуансона).

Подсистема «Штампы-3D» имеет гибкий аппарат манипулирования элементами конструкции, который позволяет «собирать» штамп из элементов по принципу детского конструктора. При этом автоматически устанавливаются ассоциативные связи проектируемой детали с элементами «соседей по сборке». Это позволяет проектировщику свободно создавать достаточно сложные оригинальные конструкции штампов из имеющихся в системе элементов (рис. 1.4). Проектировщик сам формирует техническое описание будущего штампа в виде «Дерева проекта», которое отражает номенклатурный состав элементов конструкции и состав задач, подлежащих решению в процессе проектирования.

Из предлагаемых системой вариантов он выбирает необходимые элементы конструкции штампа и включает их в «Дерево проекта» (рис. 1.5). Наличие базы элементов конструкции штампов и «Дерева проекта» позволяют развивать систему путем наращивания объектов проектирования (элементов конструкции и расчетных задач) и совершенствования работы с «Деревом проекта».

Выполнить проектирование штампа листовой штамповки, определить характеристики формоизменения и провести проверки, в том

числе прогнозировать изменение пружинения и внести необходимые технологические корректировки позволяет пакет *PAM-STAMP* компании *ESI Group* (Франция) [29]. Программа охватывает весь процесс листовой штамповки от проектирования штампа до характеристик формоизменения и проведения проверки, в том числе прогноз изменения пружинения и внесение необходимых технологических корректировок.

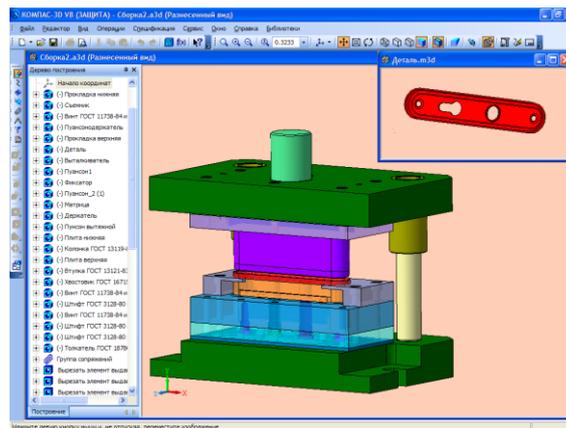


Рис. 1.4. Модель штампа для вытяжки, формовки



Рис. 1.5. Дерево проекта

Модульная структура программы направлена на моделирование всех элементов процесса штамповки – от проектирования инструмента и выбора заготовки до расчета осуществимости процесса и итогового проверочного расчета с определением всех технологических параметров перед запуском в производство. Модуль *AUTOSTAMP* предназначен для проведения основного расчета процесса листовой штамповки, позволяющего промоделировать всю технологическую цепочку от укладки заготовки на поверхность штампа до окончательных

отделочных операций. Помимо обычных операций ОМД данный решатель позволяет рассчитывать деформацию труб – гибку и гидроформовку. По модулю *DIE Compensation* рассчитывают пружинение заготовки после штамповки. Эти данные могут быть использованы для изменения геометрии деформирующего инструмента с целью компенсации пружинения готового изделия. Основная задача модуля *PAM-DIEMAKER* состоит в создании готовой штамповой оснастки, которую в дальнейшем можно использовать как при расчетах, так и запускать в производство. Развертка детали в модуле *PAM-INVERSE* позволяет получить форму и размеры исходной заготовки перед штамповкой, а также наложить кривые обрезки на изделие. При решении обратной задачи оценивается напряженно-деформированное состояние металла и величины изменения толщины, благодаря чему можно получить первые сведения о технологичности процесса. С помощью модуля *QUIKSTAMP PLUS* проводят быструю оценку технологии на осуществимость в течение нескольких минут, которая покажет картину деформации металла, основные дефекты производства, и это даст необходимую информацию для корректировки технологии.

Развертку 3D-модели позволяют получить специальные модули САПР среднего уровня, предлагаемые, например, в пакете *Autodesk Inventor*. Модули автоматизируют вычисление коррекции на изгиб на основе углов сгиба, толщины металла и допусков.

При выполнении операций раскроя в САПР *NX* компании Siemens PLM Software [29] могут использоваться таблицы разрешенных значений для величины толщины листа, радиусовгиба и других параметров. Возможность разворачивания поверхностей двойной кривизны позволяет проектировать изделия из листового материала гораздо более сложной конфигурации. В САПР *NX* определение оптимальных параметров раскроя листового материала выполняется в специальном программном инструменте. На конечные результаты раскроя влияют такие параметры, как минимально допустимые расстояния от края заготовки до вырубленного контура (боковая перемычка), минимально допустимые расстояния между контурами (перемычка по шагу штамповки), число рядов и тип раскроя (встречный или простой). Изменяя эти значения, пользователь имеет возможность подобрать оптимальную схему раскроя для конкретных производственных условий. В качестве исходного материала могут применяться прутки, рулон, лист, лента или полоса. Конструктор может проектировать детали из листового материала и добавлять такие элементы, как скругления, фланцы, вырезы и другие формообразующие элемен-

ты. Для управления геометрией развертки используют таблицы гибки с учетом технологических условий деформации. На чертежах развертки деталей можно задать отображение направления гибки.

В *PTC Creo Parametric* [29] предусмотрено быстрое создание геометрии листовых деталей с помощью функций автоматического подреза сгибов, создания разрывов, изгиба копланарных граней, упрощения формы матрицы и создания развертки. Полученную развертку можно редактировать, например, изменять форму угловых высечек так, чтобы они соответствовали технологическим процедурам. Специальный набор инструментов моделирования и утилиты дают возможность создания спецификации.

САПР среднего уровня *ADEM* [29] также имеет в своем составе модуль *ADEM Nesting* для решения задач раскроя и оптимальной раскладки деталей на листе.

Из отечественных программных комплексов листовой штамповки также можно выделить *Техтран – Листовая штамповка, Раскрой листового материала* компании НИП-Информатика [29]. Программа сочетает возможности системы подготовки управляющих программ с функциями организации производственного процесса. Подход к решению, использованный в программе, суммирует опыт работы ряда предприятий, эксплуатирующих дыропробивные прессы с числовым программным управлением и комбинированные машины, объединяющие штамповку и лазерную резку. Возможна интеграция с *Autocad* и *Лощман (Аскон)*.

Form-Advisor компании *C3P Software International (Китай)* [29] – профессиональное CAD/CAE решение для быстрого проектирования и оптимизации процессов листовой штамповки на ранних стадиях разработки, моделирующее последовательное изменение формы заготовки. Система позволяет проектировать процесс штамповки и оценивать на ранних этапах работы его эффективность, выявляя проблемные области (поднутрения, тенденции к складкообразованию, утонения, утолщения и т. д.), а также производить всестороннее сравнение различных вариантов проекта в короткие сроки. *Form-Advisor* может использоваться как в качестве интегрированного с системами *CATIA*, *NX*, *Creo*, *Autodesk Inventor* и *Solidworks* решения, так и независимо от них с собственной программной средой. В этом случае модель детали может импортироваться в систему через стандартные или прямые интерфейсы обмена данными. Специальные средства проектирования процесса штамповки и создания рабочей поверхности штампа в совокупности с проводниками процессов и шаблонами ти-

повых операций и переходов позволяют упростить и ускорить проектирование процесса штамповки и отработку его параметров. Использование функции быстрой автоматической генерации сетки конечных элементов и поддержка параллельных и удаленных вычислений помогают быстро получать результаты анализа, которые могут быть представлены в виде графиков и анимаций, а также экспортированы в формат видео.

COPRA Metal Bender компании data M Sheet Metal Solutions GmbH (Германия) [29] – специализированный набор программных модулей, реализованных в виде приложений к AutoCAD и семейству продуктов Autodesk Inventor для проектирования изделий из листового материала. Для Autodesk Inventor компания data m Software gmbh разработала два модуля серии Copra Metal Bender: Copra MetalBender td-i (transitions and ducts) и Copra MetalBender Analyser-I, которые значительно расширяют и дополняют возможности Inventor в области тонколистового проектирования. Copra MetalBender TD-I – проектирование и построение разверток сложных переходов и каналов. Copra MetalBender Analyser-I – расчет разверток моделей, созданных в Inventor. Эти модули включены в пакет Copra MetalBender for Inventor, поскольку в основе режима тонколистового проектирования Autodesk Inventor лежит технология, предоставленная компанией data m Software gmbh, приложения Copra MetalBender TD-I и Copra MetalBender Analyser-I обеспечивают хорошую интеграцию в среду и встроенную систему управления проектом Autodesk Inventor. Проектировщик работает фактически в одном пакете и использует единую технологию работы.

Программный продукт *BlankWorks* компании Forming Technologies Incorporated [30] – экономичный и простой модуль для расчета контуров заготовок для пользователей, не имеющих опыта работы с конечно-элементным анализом или штамповкой металла, который полностью интегрирован в среду SolidWorks. BlankWorks рассчитывает точную форму заготовки для простых и сложных деталей. В отличие от большинства подобных систем, BlankWorks способен работать с деталями, изготавливаемыми частично штамповкой с объемной деформацией, а частично – гибкой. Расчет заготовки занимает несколько минут и дает результат, имеющий точность, достаточную для предварительной оценки технологичности, оценки расхода и оптимизации раскроя материала. BlankWorks отображает также эпюру степени утонения материала (рис. 1.6).

При этом необходимо выбрать нужные поверхности, указать материал и запустить автоматическое создание расчетной сетки и сам

расчет (рис. 1.7). В системе используется встроенная, настраиваемая библиотека материалов, что позволяет учесть их реальные свойства. BlankWorks точно определяет форму заготовки для любых деталей из листового металла, включая детали с существенной деформацией материала. Полученные заготовки могут быть использованы для раннего анализа стоимости продукции, оптимизации раскроя материала и предварительной оценки штамповки.

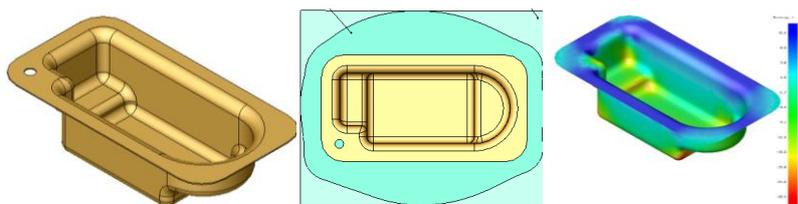


Рис. 1.6. Пример результатов расчета заготовки и построения эпюры утонения детали сложной формы

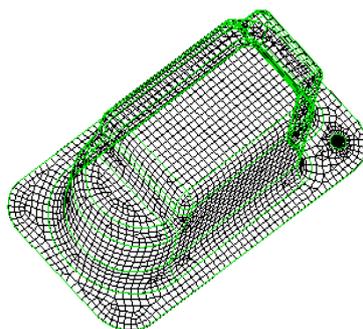


Рис. 1.7. Автоматическое создание расчетной сетки

Системы легкого класса (см. табл. 1.1) служат для простого двумерного черчения, поэтому их обычно называют электронной чертежной доской. И хотя к настоящему времени «легковесы» обрели и некоторые трехмерные возможности, но у них нет средств параметрического моделирования, имеющих в более мощных системах.

Первые системы двумерного моделирования появились еще в 1970-х годах, когда были разработаны средства для изображения линий, окружностей и кривых на экране монитора с помощью макрокоманд и интерфейсов прикладного программирования. Однако подлинный расцвет в этой области наступил лишь в 1980-х, когда на сцену вышел персональный компьютер. События развивались быстро: в 1982 году была основана компания Autodesk, которая занялась разработкой САПР для ПК под названием AutoCAD, а уже к 1987 году было продано 100 тыс. копий AutoCAD (в 2002 году это число превыси-

ло 4 млн). Примеру Autodesk последовали и другие компании, и сейчас существует множество разнообразных «легких» САПР, включая DataCAD, CADopia и др. Эти продукты имеют простой интерфейс и небольшую стоимость (от 50 до 3 000 долл.).

Таким образом, характеризуя имеющиеся в настоящее время программные продукты различного уровня для сопровождения технологических процессов, следует отметить, что большинство из них связаны с автоматизацией проектирования машиностроительного производства, а конкретнее – операций и инструмента листовой штамповки,ковки и объемной штамповки. Для других процессов ОМД (прокатки, прессования и т. д.) используются специализированные системы инженерного анализа.

Типичным представителем таких систем стал специализированный программный комплекс DEFORM [31], в основе которого лежит метод конечных элементов. Этот комплекс – разработка американской компании Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), основанной в 1991 году сотрудниками Battelle Memorial Institute (Columbus, Ohio), ранее работавшими над первым в мире расчетным комплексом для моделирования процессов обработки металлов давлением Alpid. Система DEFORM нашла широкое применение в промышленности, ее используют свыше 90 % компаний США, занимающихся обработкой металлов давлением и термообработкой. Благодаря своим возможностям и широкому применению в промышленности система стала известна и за пределами США. Пользователями DEFORM являются ведущие металлургические и машиностроительные компании Европы, Японии, Кореи, Китая, Индии и многих других стран.

Программный комплекс DEFORM создан специально для технологов, имеет простой русскоязычный Windows-интерфейс и не требует специальных математических знаний. Он незаменим на самой длительной и дорогостоящей стадии технологической подготовки производства – стадии отработки, доводки и внедрения технологии. DEFORM не замещает технолога – он является инструментом технолога. По стандартным методикам на основе накопленного опыта разрабатывается технология изготовления того или иного изделия. Далее при помощи программного комплекса DEFORM технологию проверяет сам технолог на своем рабочем месте. В отличие от реального производства, где результаты можно получить лишь через несколько месяцев, компьютерное моделирование позволяет сделать это уже через несколько часов или даже минут. При этом технолог может загля-

нуть «внутри» процесса, что невозможно на производстве, проследить за течением материала, увидеть возможные дефекты (складки, зажимы, утяжены, незаполнения и пр.). DEFORM включает возможности исследовательской лаборатории и позволяет получить информацию о напряженно-деформированном состоянии поковки (штамповки) на разных этапах деформирования, распределении температуры, макро- и микроструктуре, напряжениях в инструменте, потребном усилии процесса деформирования и о многом другом.

Оперативно владея всей этой информацией, технолог лучше представляет себе данный технологический процесс, может оценить влияние на него различных параметров, видит возможные пути его исправления и оптимизации. Технолог может проверить десятки, а то и сотни вариантов технологического процесса и выбрать из них оптимальный с точки зрения затрат и качества.

DEFORM является эффективным средством для математического моделирования операций обработки металлов давлением. При наличии соответствующего вычислительного комплекса и подготовленной базы данных по механическим и физическим свойствам деформированных материалов и материала инструмента, а также физических свойств смазочных материалов данный программный продукт может служить основой для оперативного проектирования и разработки технологических процессов формоизменения.

Программа позволяет задать практически любое оборудование – это гидравлические прессы, молота, винтовые прессы, кривошипные прессы, прокатные станы, причем, задав параметры всего оборудования, можно создать библиотеку оборудования данного предприятия или цеха. Специальные шаблоны (визарды) помогают задавать сложные процессы (например, протяжка на молотах с учетом остывания, промежуточным нагревом и вращением заготовки).

DEFORM имеет САD-интерфейсы, позволяющие импортировать геометрию инструмента из любых САD-систем. В 2D-модулях – это DXF и IGES, в 3D-модуле – это STL и сеточные форматы PATRAN и I-DEAS. При чтении геометрических файлов применяются специальные операции диагностики и автоматической очистки для последующей генерации сетки. Компанией ТЕСИС также разработано специализированное приложение к САD-системе среднего уровня SolidWorks, позволяющее напрямую передавать геометрию из этой популярной системы в DEFORM.

Полностью автоматическая оптимизированная генерация сетки выполняется с помощью генератора сетки AMG (рис. 1.8).

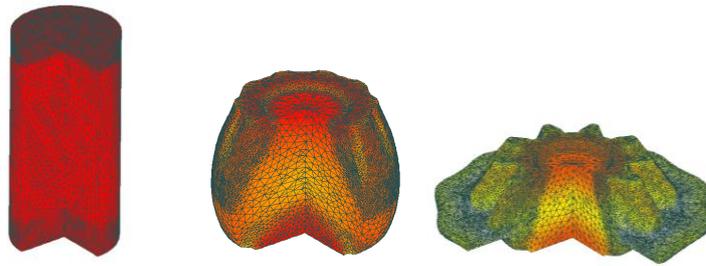


Рис. 1.8. Конечно-элементная сетка, построенная автоматическим генератором AMG

Как правило, расчет начинается с достаточно грубой сетки, которая может иметь сгущения в зонах начального контакта заготовки с инструментом. Пользователь имеет все возможности по контролю над плотностью сетки и характерным размером элемента как при создании модели, так и в процессе счета. Например, пользователь может расставить в пространстве специальные зоны сгущений сетки, которые могут двигаться вместе с инструментом. В процессе счета сетка перестраивается полностью автоматически. Критериями перестроения могут служить искажения формы элементов и проникновение элемента в инструмент, если сетка слишком груба и неадекватно описывает течение материала в зонах мелких конструктивных особенностей инструмента. Автоматически сетка сгущается с учетом весовых коэффициентов, которыми могут быть уровень пластических деформаций, скорость пластической деформации, температура, кривизна поверхности и др. Выбор характерного размера элемента очень важен для выполнения расчета, быстро и точно описывающего сложное трехмерное пластическое течение металла. Если сетка будет неоправданно сгущаться, то скорость счета будет значительно замедляться, а если сетка будет слишком редкой, то процесс будет рассчитан неточно. Поэтому, несмотря на полную автоматизацию перестроения сетки, пользователи DEFORM всегда имеют возможности перестраивать сетку так, как это необходимо для проведения анализа.

Применение современных алгоритмов позволяет DEFORM проводить расчеты достаточно быстро. Новые схемы построения элементных матриц, новый итерационный решатель, использование параллельных алгоритмов на многопроцессорных системах, в том числе и на платформе Windows NT, вместе с современными вычислительными комплексами позволяют сократить время расчета сложных трехмерных процессов до нескольких часов.

Система DEFORM предоставляет широкие возможности для обработки результатов, оценки процесса на наличие дефектов (образование трещин, складок, незаполнение штампа и др.), анализа течения материала. Результаты включают в себя график усилия, поля распределения напряжений, деформаций и температуры, причем они могут быть представлены графически и таблично.

Для анализа деталей, имеющих осесимметричную форму (рис. 1.9), вытянутую в одном направлении форму или форму, близкую к осесимметричной, используется модуль DEFORM-2D. Типичными процессами, моделируемыми в DEFORM-2D, являются горячая объемная штамповка, прессование, волочение, холодная высадка, осадка, прокатка и многие другие процессы. Для расчета формоизменения металла деталей, имеющих сложную трехмерную форму (рис. 1.10), используют модуль DEFORM-3D. DEFORM позволяет моделировать пластическое течение материала для горячих, полугорячих и холодных процессов, причем это могут быть как изотермические, так и неизотермические процессы.

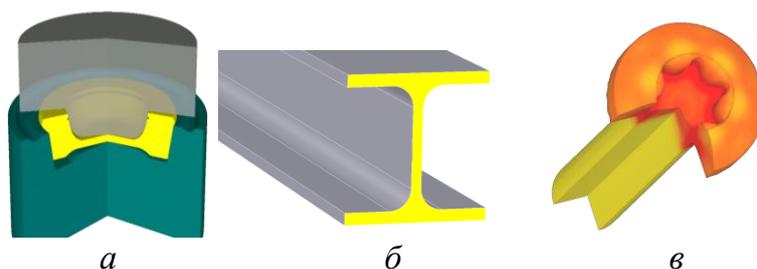


Рис. 1.9. Задачи, анализируемые в системе DEFORM™-2D:
a – деталь осесимметричной формы; *б* – деталь с вытянутой в одном направлении формой; *в* – деталь, имеющая форму, близкую к осесимметричной

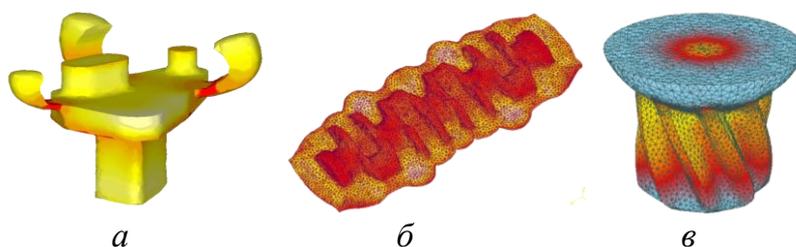


Рис. 1.10. Задачи, анализируемые в системе DEFORM™-3D:
a – деталь сложной трехмерной формы; *б* – деталь, имеющая плоскую симметрию; *в* – деталь, имеющая симметрию вращения

Теплопередача между объектами и внутри объектов может быть проанализирована как отдельный процесс или совместно с процессом

деформирования по сопряженной схеме. В расчете принимают во внимание все факторы, влияющие на процесс штамповки: конвекцию, излучение, тепловыделение при фазовых переходах и пластических деформациях, выделение тепла при трении, потери тепла в зоне контакта между заготовкой и инструментом, влияние температуры на коэффициент трения и термомеханические характеристики материала, влияние давления на трение и т. д.

Многоцелевой пакет *ANSYS/LS-DYNA* компании Livermore Software Technology Corporation (США) [32], использующий явную постановку метода конечных элементов (*explicit finite element program*), предназначен для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют инженерам во всем мире успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формования (процессов ОМД). Пакет объединяет в себе расчетный модуль *LS-DYNA* со средствами подготовки исходных данных и обработки результатов. Соответственно, не выходя из сессии *ANSYS*, можно создавать конечно-элементную модель в препроцессоре *ANSYS*, получать решение по явной схеме интегрирования, используя *LS-DYNA*, и просматривать результаты с помощью стандартных постпроцессоров *ANSYS*. Стандартная конфигурация *ANSYS* и пакет *ANSYS/LS-DYNA* дополняют друг друга. В *ANSYS* поддерживаются неявные (*implicit*) методы интегрирования динамики, использующие схему Ньюмарка. Расчет сводится к серии решений квазистатических задач с нагрузками, зависящими от времени. Временной шаг может быть не очень малым, поскольку при каждом шаге выполняется решение системы уравнений и проводятся уравновешивающие итерации, связанные с матричными операциями. При линейной матрице жесткости интегрирование безусловно устойчиво. Для высокоскоростных процессов (протекающих обычно несколько миллисекунд) и при очень больших деформациях приходится делать шаги весьма малыми, чтобы отследить изменение нагрузки и поведение конструкции. Инерционные нагрузки велики и определяются ускорениями конструкции. Для более точного их расчета эффективно будет вводить ускорения (и скорости) в число узловых степеней свободы и вычислять их напрямую, а не дважды, дифференцируя перемещения. В случае вынужденных постоянных пересчетов матриц формирование полной матрицы и ее многократное решение при переменных нагружениях неэффективны. Критерии сходимости, установленные по умолчанию,

настроены на достаточно длительные задачи, поэтому их подбор на практике весьма трудоемок (а порой невозможен). Таким образом, при малом шаге решения задач (например удара) может потребоваться больше (в десятки и сотни раз) времени ЭВМ, чем при использовании явных методов, либо не сойтись.

Особенности ANSYS/LS-DYNA:

- в программе ANSYS/LS-DYNA не очень много типов элементов, но для каждого из них имеется выбор множества формулировок, и они поддерживают практически все разрешенные модели материалов;

- хотя препроцессор ANSYS поддерживает далеко не все из более чем 230 моделей материалов LS-DYNA, но их можно ввести «вручную», отредактировав соответствующий файл. Следует отметить, что поставляемый модуль позволяет решать все задачи, не поддерживаемые ANSYS/LS-DYNA. Пользователям предоставляется полная версия LS-DYNA (с моделями подушек и ремней безопасности, взрывчатки и т. п., сложными моделями материалов);

- в отличие от ANSYS Implicit, очень многие модели материалов поддерживают разрушение.

- наряду с привычными компонентами многие команды подразумевают ввод частей (Part) – групп элементов, имеющих одинаковые атрибуты: тип элементов, номер материала и номер набора Real констант. Группы Part создаются автоматически после ввода элементов.

- решение контактных задач в ANSYS/LS-DYNA организовано удобнее, чем в обычной ANSYS. Существует множество контактных алгоритмов, вместо специальных контактных элементов назначаются контактные пары (возможен и автоматический поиск контактирующих пар). Значения параметров, принятые по умолчанию, как правило, обеспечивают хорошую сходимость.

- применение концепции жестких тел (Rigid Body) для тел, напряженное состояние которых в данный момент времени неактуально (например при падении вплоть до момента контакта), позволяет значительно экономить машинные ресурсы. При этом в процессе расчета тела могут переводиться из жестких в деформируемые и обратно.

- нагрузки всегда вводятся массивами по времени и соответствуют одному шагу нагружения.

- расчеты ANSYS/LS-DYNA можно проводить и в стандартной лагранжевой постановке, и в комбинированной лагранж-эйлеровой (Arbitrary Lagrange-Euler). В LS-DYNA поддерживается и полная эйлерова постановка, для которой следует дополнить файл, подготовленный препроцессором ANSYS. Лагранжева постановка подразуме-

вадет деформируемую сетку, а при эйлеровой сетка неподвижна и должна создаваться всюду, где возможно нахождение конструкции или ее «осколков». Элементы могут быть заполнены либо воздухом, либо материалом, в том числе и частично. При ALE-формулировке пространство можно не разбивать на элементы – происходит коррекция (адвекция) сетки для улучшения формы элементов;

– исполняемым файлом для LS-DYNA является Jobname.k – входной файл, автоматически создаваемый ANSYS при исполнении команды SOLVE. Файл содержит полную геометрию, нагрузки и характеристики материалов, присутствующие в базе данных ANSYS. Файл на 100 % совместим с LS-DYNA;

– после запуска появляется DOS-окно с указанием параметров задачи и с оценкой времени счета (на основе начального шага). Шаг по времени устанавливается автоматически, исходя из минимального текущего размера элемента и скорости звука в его материале. В процессе решения можно запросить уточненную оценку времени счета;

– довольно удобно сделано прерывание решения – его можно выполнить в любой момент с автоматическим созданием файла рестарта;

– в постпроцессор ANSYS можно передать как напряжения, перемещения и деформации, так и специфические параметры LS-DYNA: суммарные контактные силы, кинетическую и иные энергии и т. д. Создаются не только полное напряженно-деформированное состояние – файл *.rst, с возможностью анимации, например по 100 шагам, но и особый файл *.his, включающий результаты, например 10 тыс. шагов для нескольких заданных узлов (с возможностью построения графиков).

Среди особенностей программы ANSYS-LS-DYNA применительно к ОМД можно отметить следующие:

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

1.4. Содержание процесса разработки систем автоматизированного проектирования

Для того чтобы выделить в процессе создания САПР конкретные научно-методические задачи, рассмотрим его структуру и содержание обычно выполняемых в нем работ. Нормативно-техническими документами [33] регламентируется создание САПР в виде последовательности стадий, этапов и видов работ, структура которых приведена в табл. 1.3.

Рассмотрим подробнее некоторые наиболее важные с методологической точки зрения аспекты этих стадий, опираясь на работу [11].

В результате выполнения работ по выявлению и описанию существующей системы проектирования необходимо получить целостное представление о ней с точки зрения морфологического (организационного), функционального и технологического аспектов. Эта работа базируется на детальной информации об отношениях между объектами, процессами, видами обеспечения проектирования и проектировщиками. Для каждого из рассматриваемых процессов проектирования определяется оценка реально достигнутого уровня его результатов. Таким же образом оцениваются отдельные этапы процесса, то есть проектные процедуры (совокупность действий, выполнение которых заканчивается проектным решением) и операции (действие или совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры).

Кроме этих оценок описание этапов должно содержать информацию об основных параметрах выполняемых проектных операций, которая необходима для последующего диагностического анализа, в частности таких, как состав и объёмы исходных данных для выполнения операции, количество и качество получаемой информации; трудоёмкость работ по расчёту и моделированию параметров объектов проектирования, выполнению графических и геометрических построений, а также рутинных работ по подготовке и оформлению проектной документации; характеристике сложности процедур генерации альтернативных вариантов проектных решений и выбора лучшего варианта; составе и квалификации проектировщиков.

Сложность исследуемой системы вызывает необходимость в её декомпозиции, для чего проводят диагностический анализ системы проектирования. Сначала выделяют подмножество критичных процессов, которые в наибольшей степени влияют на эффективность всей системы проектирования. Для каждого из этих процессов формируют множество аспектов анализа – прообразов показателей деятельности

проектной организации, подлежащих улучшению. По каждому аспекту выполняют укрупненный анализ, устанавливающий зависимость характеристик процесса в целом от характеристик его отдельных этапов (проектных операций). Затем по результатам анализа выделяют критические операции (узкие места процесса). Наконец, каждую выделенную операцию детально анализируют – исследуют зависимости характеристик операции от её параметров, описывающих функцию (содержание) этой операции, методы и средства её выполнения, а также используемую в ней информацию. На основании анализа устанавливают конкретные причины неудовлетворительного уровня характеристик операции и определяют действенных способов их устранения.

Результаты диагностического анализа служат основой для разработки стратегии улучшения деятельности проектной организации.

Одна из наиболее ответственных работ во всем жизненном цикле САПР связана с обоснованием и принятием решения о её создании. В процессе проведения этих работ определяют ожидаемые результаты автоматизации; анализируют принципиальную возможность создания САПР, обеспечивающей получение этих результатов в условиях конкретной проектной организации; формируют состав проектных процедур и операций, подлежащих автоматизации (функций САПР), в том числе при создании первой и последующих очередей системы.

На стадии разработки технического задания наиболее важными являются: выполнение научно-исследовательских работ для определения возможностей, принципов и путей автоматизации проектных процедур и операций; разработка аванпроекта САПР, представляющего целостное описание системы проектирования в условиях автоматизации. На этапе разработки аванпроекта предусмотрен определенный порядок работ (рис. 1.11). На первом этапе выполнения аванпроекта разрабатываются функциональные подсистемы САПР на основе множества функций (проектных процедур и операций), выбранных для автоматизации на предыдущей стадии. В результате этой процедуры формируется перечень проектирующих и обслуживающих подсистем САПР, а также структура каждой подсистемы.

Элементами такой структуры служат комплексы задач, каждый из которых реализует логически законченную часть проектной процедуры (операции). При разработке функциональной структуры САПР её представляют в виде нагруженного ориентированного графа, вершины которого соответствуют функциональным подсистемам или комплексам задач, а дуги – информационным связям между ними.

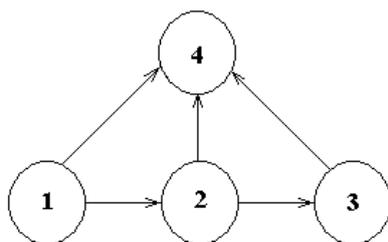


Рис. 1.11. Порядок выполнения основных работ на этапе аванпроекта:
 1 – формирование функциональных подсистем САПР; 2 – разработка функциональной структуры САПР; 3 – формирование топологической и функционально-топологической структуры САПР; 4 – разработка внешнего представления технологии автоматизированного проектирования

Функционально-топологическая структура САПР есть граф топологии системы, на который наложена функциональная структура. При формировании вариантов структуры необходимо рассматривать следующие параметры: число уровней САПР; топологию САПР, то есть территориальное размещение терминальных комплексов и пунктов обработки информации (ПОИ) и структуру связей между ними; распределение между ПОИ тех функциональных подсистем и комплексов задач, для которых место обработки не обусловлено внешними факторами.

Разработка внешнего представления технологии автоматизированного проектирования заключается в описании последовательности и методики выполнения ручных и автоматизированных операций в ходе осуществления проектных процедур.

Весь комплекс предпроектных работ завершается разработкой технического задания, которое является исходным документом для создания САПР и содержит основные разделы, приведенные в табл. 1.3.

Эскизный проект предусматривает разработку вариантов построения САПР и включает в себя целый ряд основных работ.

1. Выделение функциональных задач (ФЗ) и построение схемы взаимосвязи ФЗ для каждой функциональной подсистемы. Функциональная задача – это наименьший элемент функциональной подсистемы, рассматриваемый как целое в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации САПР. Для создания САПР важное значение имеет корректная постановка задач. Поэтому необходимо разрабатывать основные разделы, входящие в описание постановки ФЗ, а именно: назначение и содержание автоматизируемой функции (проектной или обслуживающей операции); технико-экономическое обоснование

целесообразности решения (описание ожидаемых результатов и эффекта от автоматизации); структура, содержание и формы представления входных и выходных данных; описание информационных потребностей задачи в виде внешней концептуальной схемы данных; предполагаемый метод решения; регламент (частота, или периодичность) решения; технология решения; требования к режиму решения, диалогу с пользователем и функциональным возможностям терминального комплекса (для интерактивного режима), к времени решения и/или времени реакции на диалоговое взаимодействие, к методам синтаксического и семантического контроля входных и выходных данных, сроку хранения данных в системе.

Таблица 1.3

Структура процесса создания САПР

Стадии процесса создания САПР	Этапы на каждой стадии	Виды работ на каждом этапе
1	2	3
1. Исследование и обоснование создания САПР	<p>1.1. Обследование проектной организации</p> <p>1.2. Разработка и оформление предварительных требований к системе</p>	<p>1.1.1. Оценка эффективности функционирования и выявление проблем проектной организации</p> <p>1.1.2. Выявление и описание существующей системы проектирования</p> <p>1.1.3. Диагностический анализ системы проектирования</p> <p>1.1.4. Формирование предложений по новой системе проектирования</p> <p>1.1.5. Обоснование и принятие решения о создании САПР</p> <p>1.2.1. Оформление технико-экономического обоснования САПР: назначение, область применения; показатели эффективности и требуемый уровень их значений; функциональные требования к САПР (состав автоматизируемых процедур и операций); требования к качеству и регламенту выполнения функций; требования к совместимости САПР с другими автоматизируемыми системами; рекомендации по включению в САПР существующих средств автоматизации и/или</p>

Продолжение табл. 1.3

1	2	3
		автоматизированных процедур; описание содержания и параметров автоматизируемых проектных процедур и операций; описание основных информационных потребностей проектных процедур и пользователей САПР; требования к срокам ввода САПР в действие и другие ограничения на процесс создания системы
2. Разработка технического задания (ТЗ)	<p>2.1. Выполнение научно-исследовательской работы</p> <p>2.2. Разработка аванпроекта САПР</p> <p>2.3. Разработка технического задания на создание САПР</p>	<p>2.1.1. Определение возможностей, принципов и путей автоматизации проектных процедур и операций</p> <p>2.2.1. Формирование функциональных подсистем САПР</p> <p>2.2.2. Разработка функциональной структуры САПР</p> <p>2.2.3. Формирование топологической и функционально-топологической структуры САПР</p> <p>2.2.4. Разработка внешнего представления технологии автоматизированного проектирования</p> <p>2.3.1. Формирование основных разделов документа: наименование и область применения; основания для создания САПР; характеристика объектов проектирования; цель и назначение САПР; характеристика процесса проектирования; требования к САПР; технико-экономические показатели; стадии и этапы создания САПР; порядок испытаний и ввода в действие САПР; источники разработки</p>
3. Разработка эскизного проекта (ЭП)	<p>3.1. Разработка вариантов построения САПР</p> <p>3.2. Разработка основных решений по видам обеспечения САПР</p>	<p>3.1.1. Выделение функциональных задач (ФЗ) и построение схемы взаимосвязи ФЗ для каждой функциональной подсистемы</p> <p>3.1.2. Разработка схемы деления САПР на части</p> <p>3.2.1. Техническое обеспечение</p> <p>3.2.2. Программное обеспечение</p> <p>3.2.3. Информационное обеспечение</p> <p>3.2.4. Организационное обеспечение</p>

Продолжение табл. 1.3

1	2	3
	<p>3.3. Разработка решений по процессу функционирования САПР 3.4. Разработка документации эскизного проекта</p>	<p>3.3.1. Уточнение функциональной и функционально-топологической структуры САПР 3.3.2. Уточнение технологии автоматизированного проектирования 3.3.3. Разработка режимов и регламента функционирования САПР 3.3.4. Разработка общего алгоритма функционирования САПР 3.4.1. Составление документации по вариантам архитектуры САПР и ее частей</p>
<p>4. Разработка технического проекта</p>	<p>4.1. Разработка окончательных решений по общесистемным вопросам 4.2. Разработка решений по видам обеспечения САПР</p>	<p>4.1.1. Уточнение решений по каждому варианту архитектуры САПР в целом и ее частей 4.1.2. Проведение сравнительного анализа вариантов по всем критериям качества САПР 4.1.3. Обоснование выбора единственного варианта, наилучшим образом соответствующего требованиям ТЗ 4.1.4. Постановка задач и составление частных ТЗ для разработки видов обеспечения САПР 4.2.1. Техническое обеспечение в соответствии с выбранным на этапе 4.1 вариантом структуры комплекса технических средств 4.2.2. Детализация программного обеспечения, формирование исходных данных и требований на разработку компонентов прикладного программного обеспечения 4.2.3. Определение окончательного варианта информационного обеспечения 4.2.4. Разработка плана мероприятий по подготовке к вводу в действие САПР, определение исходных данных и требований на разработку документов организационного обеспечения 4.2.5. Математическое обеспечение: разработка и выбор методов и алгоритмов решения функциональных задач</p>

Окончание табл. 1.3

1	2	3
	<p>4.2. Разработка решений по видам обеспечения САПР</p> <p>4.3. Согласование решений по связям видов обеспечения между собой</p> <p>4.4. Составление заказной документации</p>	<p>4.2.6. Лингвистическое обеспечение: разработка и выбор языков проектирования и программирования</p> <p>4.2.7. Методическое обеспечение</p> <p>4.3.1. Проверка компонентов САПР на совместимость, а системы в целом – на соответствие ТЗ</p> <p>4.4.1. Оформление заявок на типовые компоненты и комплексы средств автоматизации, составление ТЗ на разработку уникальных технических и программных средств</p>
5. Создание рабочей документации	<p>5.1. Разработка (адаптация заимствованных) прикладных программ решения функциональных и технологических (обеспечивающих) задач САПР</p> <p>5.2. Оформление всей документации, необходимой для изготовления, ввода в действие и функционирования системы</p>	5.1.1. Координация процессов программирования задач с целью обеспечения выполнения требований ТЗ
6. Ввод САПР в действие	<p>6.1. Проведение опытного функционирования САПР</p> <p>6.2. Проведение приемочных испытаний</p> <p>6.3. Устранение замечаний, выявленных при испытаниях САПР</p> <p>6.4. Приемка САПР в промышленную эксплуатацию</p>	6.1.1. Отладка окончательной версии САПР

2. Разработка схемы деления САПР на части. Она предусматривает выработку основных решений по видам обеспечения САПР: техническое (ТО), программное (ПО), информационное (ИО) и организационное обеспечение.

На стадии разработки технического проекта принимают окончательные проектные решения, дающие полное представление о создаваемой САПР.

Из краткого рассмотрения этапов создания САПР следует, что разработка её проекта является комплексом системотехнических задач. Для того чтобы лучше понять сущность и роль системотехнических задач, решаемых на стадиях разработки проектов САПР, необходимо учитывать то, что практически все свойства системы образуются за счет выполнения в ней совокупности процессов [11]. В частности, к ним можно отнести основные (прикладные) процессы решения функциональных задач, то есть процессы выполнения автоматизированных проектных процедур и операций; процессы, обслуживающие выполнение основных процессов (например процессы информационного обслуживания с использованием баз данных, поддержка диалогового взаимодействия системы с пользователем); процессы, обеспечивающие необходимое качество выполнения основных и обслуживающих процессов при неидеальных элементах системы и условиях её работы; процессы, которые организуют выполнение основных процессов.

1.5. Цели и задачи проектирования технологических процессов

Проектирование в самом широком смысле сводится к определению совокупности данных, необходимых и достаточных для воспроизведения детали, технической системы или технологии. Часто названия систем, реализующих различные задачи проектирования, детализируются, например, системы, предназначенные для разработки технологии, называются автоматизированными системами технологической подготовки. Но это не изменяет основного их содержания, которое направлено на определение проектных параметров технологического процесса для воспроизведения какой-либо продукции.

Решение задачи выделения проектных параметров и построения математической модели, описывающей структуру проектируемой системы и характеристики составляющих ее компонент, возможны только на основе детального анализа конкретного класса систем.

Цель проектирования не зависит от методики и средств, которые при этом применяют. Рассмотрим проектную ситуацию и цель на примере технологической системы прессования алюминиевых профилей [3; 12]. Исходной информацией для проектирования техноло-

гии изготовления прессованных профилей служат согласованный с заказчиком чертеж профиля (нормаль) и его отличительные признаки, представленные в наряд-заказе на изготовление и поставку, а именно: шифр профиля, марка сплава, состояние материала, технические условия (ТУ) поставки, сдаваемая длина и особенность сдаваемой длины (мерная, кратная, немерная).

Объем технологической подготовки производства зависит от того, к какой из групп может быть отнесено пресс-изделие: профилям новых неосвоенных в производстве шифров; профилям освоенных в производстве шифров с новыми особенностями изготовления (новыми признаками: сплав, состояние материала, технические условия, сдаваемая длина); профилям освоенных в производстве шифров с освоенными особенностями изготовления.

Для изделий первой группы требуется решить в полном объеме все задачи подготовки производства. В первую очередь к ним относятся технологические задачи, связанные с проектированием, регулированием и совершенствованием технологических процессов. При их разработке необходимо дать, во-первых, структурно-параметрическое описание технологического маршрута изготовления (выбор метода прессования), оборудования и типа матрицы, диаметра контейнера, числа каналов в матрице и выделить ограничения первой группы, обусловленные выбранным оборудованием и инструментом, размерами заготовки и полуфабрикатов по этапам обработки, во-вторых, определить режимы проведения операций и выделить ограничения второй группы с учетом марки сплава, состояния материала, ТУ поставки и сдаваемой длины. Затем следует рассмотреть технические задачи, относящиеся к конструированию и изготовлению технологического инструмента, оснастки и использованию оборудования. И наконец, решить организационно-плановые задачи, связанные с разработкой различной плановой документации. Из всех типов задач определяющими являются задачи проектирования технологических процессов, а остальные – производными.

Для изделий второй группы заранее определены технологические параметры, не зависящие от особенностей их изготовления, спроектирован и изготовлен инструмент. Новые особенности изготовления изделий могут потребовать установления новых размеров заготовок для прессования и других параметров.

Для изделий третьего вида проектировать технологию и инструмент нет необходимости. Все эти задачи уже решены до получения наряд-заказа. В результате появляется условно-постоянная техноло-

гическая информация, необходимая при подготовке производства для проектирования инструмента и расчета технологических параметров вариантов изготовления профилей.

Для профилей освоенных шифров с новыми вариантами (признаками) изготовления достаточно решить только вторую задачу технологического проектирования. Число таких изделий в наряд-заказах, поступающих на предприятие, обычно в несколько раз превышает число профилей неосвоенных шифров. Поэтому основное время, требуемое для технологической подготовки производства, приходится уделять изделиям, относящимся ко второй группе.

Результат проектирования технологии – это технологическая разработка, которая включает условно-постоянную информацию (структурно-технологический маршрут изготовления, наименование оборудования и инструмента для выполнения каждой операции) и параметрическую (режимы проведения назначенных операций, переменную информацию о технологических параметрах для вариантов изготовления профилей).

Маршрут изготовления профиля определяется в основном его типом, маркой сплава и состоянием материала. Характеристики оборудования зависят от размеров и конфигурации профиля, марки сплава. Режимы обработки, включаемые в технологическую карту, характеризуются маркой сплава, состоянием поставки и размерами поперечного сечения профиля. При формировании условно-постоянной части разработки обычно руководствуются нормативно-справочным материалом, который содержится в отраслевых и заводских технологических инструкциях, а также личным производственным опытом.

В переменной части технологической разработки для каждого освоенного варианта изготовления профиля на прессовом оборудовании представляют результаты расчета длины профиля, длины заготовки, а также нормы расхода металла (коэффициент выхода годного) и другие параметры. Технологическую разработку используют при проверке поступающих наряд-заказов. Если требуется изготовить профиль освоенного шифра с особенностями изготовления, то в книгу наряд-заказов переносят из технологической разработки основные расчетные показатели. Для профиля освоенного шифра с новыми особенностями изготовления определяют показатели для новой строки технологической разработки, которые заносят и в технологическую разработку, и в книгу наряд-заказов.

В случае заказа профиля неосвоенного шифра предварительно разрабатывают и оформляют технологическую разработку, включая в

нее часть с условно-постоянной информацией и часть с параметрами изготовления конкретного заказанного варианта.

Процесс прессования – это технологический процесс, важнейшая особенность которого – гибкость. Она заключается в том, что переход с одного профилеразмера на другой при прессовании происходит путем смены матрицы – основного инструмента – в считанные минуты. Для каждого нового профиля требуется спроектировать прессовую матрицу.

Проектирование матриц представляет собой ряд задач, которые решает конструктор. Определение продольного профиля матрицы и выбор ее формы (плоская, коническая или какая-либо другая) в зависимости от условий, которые необходимо обеспечить при прессовании заданного профиля. Определение поперечных размеров канала матрицы с учетом температурных изменений геометрии инструмента и пресс-изделия, упругих деформаций различных элементов канала, происходящих под нагрузкой (этот расчет должен определить те размеры канала, которые обеспечат заданную точность профиля). Расчет на сопротивление механическим нагрузкам с учетом наибольшего давления прессования (здесь стремятся получить такую конструкцию матрицы, которая позволит по возможности снизить упругие деформации, являющиеся причиной снижения точности размеров поперечного сечения пресс-изделия). Определение характеристик канала, которые влияют на условия истечения прессуемого металла: размещение канала относительно осей матрицы, взаимного расположения отдельных каналов при проектировании многоканальной матрицы, высоты рабочих поясков, угла их наклона к оси матрицы, формы и размеров форкамер.

При проектировании комбинированной матрицы для прессования новых профилей еще определяют форму и объемы сварочных зон, некоторые другие связанные с ними конструктивные элементы, а также очертания поперечного сечения рассекателя.

Одной из задач, ориентированных на процесс изготовления матриц, является подготовка программ для станков с числовым программным управлением на основе информации о спроектированной матрице.

Наряду с рассмотренными традиционными для прессового производства задачами проектирования в последние годы актуальными стали новые задачи, связанные с обеспечением еще на стадии проектирования заданного качества функционирования технологических систем по таким критериям, как точность и стабильность, которые ха-

рактируют соответствие фактических значений параметров продукции и процессов заданным и надежность, т. е. вероятность выполнения заданий по параметрам изготавливаемой продукции, производительности, затратам и объему выпуска.

Решение проблемы обеспечения заданной точности, стабильности и надежности функционирования выдвигает ряд задач анализа, синтеза и управления, которые должны быть решены на стадии проектирования и эксплуатации систем.

1. *Задачи анализа* (прямые задачи), решаемые при условии известной структуры технологической системы (или выбираемой на стадии создания) и наличия математических моделей, предполагают следующее: оценку состояния, при которой по заданным значениям входных параметров (управляемых и неуправляемых) определяются значения внутренних и выходных параметров в заданный момент времени; оценку работоспособности, которая включает анализ влияния возможных производственных и эксплуатационных отклонений входных параметров от расчетных на разброс внутренних и выходных параметров; прогнозирование состояния (разброс параметров и постепенные отказы), при котором по заданным в начальный момент времени значениям входных параметров предсказывается момент отказа функционирования или интервал времени, в течение которого возможен этот отказ; выбор оптимальных номинальных значений входных параметров, обеспечивающих экстремальные значения отдельных выходных параметров при наложении ограничений на остальные.

2. *Задачи параметрического синтеза* решают с целью выбора таких параметров технологических систем, которые обеспечивают заданные требования к качеству их функционирования и включают следующие процедуры: поиск заданного состояния технологической системы по заданным условиям работоспособности; выбор совокупности управляемых (настроечных) параметров, позволяющих эффективно осуществлять подстройку и управление качеством функционирования технологической системы, и оценку допустимых интервалов их вариаций; оценку работоспособности при статистическом характере выбранных исходных параметров и возможных трендовых изменениях; оптимизацию поля допусков на разброс исходных параметров по критерию минимума полей рассеивания выходных параметров; оптимизацию номинальных значений параметров, которые изменяются во времени, например износ инструмента.

3. *Задачи управления* включают: контроль и поддержание процесса с точки зрения соблюдения технологических предписаний по

изготовлению продукта в реальном режиме времени (*online*); совершенствование и создание технологических контуров регулирования и их исполнительных органов; разработку программного обеспечения для интегрированных систем контроля и управления функционированием технологических систем.

Для решения данных задач необходимо создание прогнозных моделей и алгоритмов (наравне с проектными), а также разработка методологических основ их построения.

При постоянном расширении номенклатуры новых изделий, увеличении числа наряд-заказов на небольшие объемы их выпуска, ужесточении требований к качеству необходимость выполнения гарантированного объема конструкторско-технологических проектов и подготовки производства в минимально короткие сроки вступает в противоречие с необходимостью выполнения более точных расчетов, анализа значительного числа вариантов расчета заготовки и выбора из них наиболее близкого к оптимальному, качественного конструирования и быстрого изготовления инструмента. Эти противоречия могут быть разрешены только на основе представления процесса проектирования в виде алгоритма и проведения расчетов с использованием ЭВМ, т. е. создания САПР технологических процессов.

Разработка алгоритмов и программного обеспечения таких САПР была начата на кафедре обработки металлов давлением Красноярского института цветных металлов в 90-х годах прошлого столетия. При этом в силу специфики обучения студентов различным технологическим процессам (прокатка, штамповка, волочение, прессование и т. д.) и благодаря исследованиям широкой гаммы черных и цветных металлов и сплавов, научные основы обработки давлением которых разрабатывались учеными кафедры, в том числе и с привлечением студентов, в течение этого времени, были созданы методологические основы, математические модели и авторские методики расчетов данных процессов. Позже (вместе с развитием компьютерной техники) они были представлены в виде алгоритмов расчета различных технологических процессов и на их основе были созданы программные средства, послужившие основой представленных ниже систем автоматизированного проектирования.

Глава 2

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ И ПРЕССОВАНИЯ

2.1. САПР горячей листовой прокатки цветных металлов и сплавов (САПР ROLLING)

Особенностью анализа многих операций обработки металлов давлением, например прокатки, является необходимость многовариантных расчетов процесса формоизменения металла и энергосиловых параметров с учетом необходимых ограничений. В связи с этим разработанная и приведенная ниже САПР горячей листовой прокатки ROLLING дает возможность не только сократить время подготовки производства, но и провести сравнение полученных вариантов расчета с позиций производительности и экономии энергетических затрат для технологических процессов, включающих большое количество обжатий при деформации металла.

Общая структура алгоритма и исходные данные для расчетов

В программе используется математическая модель расчета оптимального режима обжатия при горячей прокатке цветных металлов и сплавов, полученная в результате теоретических и экспериментальных исследований этого процесса на реверсивных и последовательных станах, изложенная в работе [2].

Алгоритм программы (рис. 2.1) включает формирование исходных данных, расчет геометрических размеров полосы, определение скоростного режима прокатки, температуры раската и энергосиловых параметров, проверку ограничения режимов деформации и корректировку рассчитанной высоты полосы в каждом проходе. Также в про-

цессе разработки программы проведена аппроксимация графической информации, в результате чего получены формулы, которые включены в программу, что позволило существенно сократить количество требуемых исходных данных.

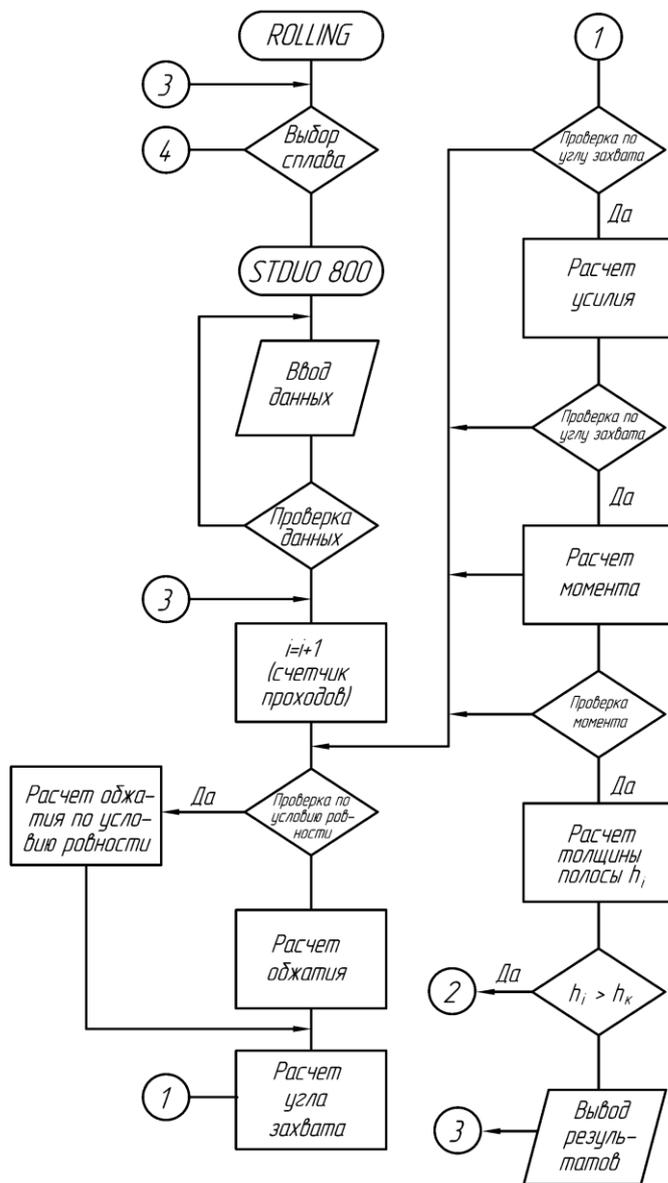


Рис. 2.1. Блок-схема алгоритма программы ROLLING

Программа ROLLING написана на алгоритмическом языке ПАСКАЛЬ и предназначена для работы на ЭВМ типа IBM PC/AT и с ней совместимых. В качестве исходных данных для расчетов используется следующая информация: техническая характеристика стана; параметры, характеризующие свойства полосы; геометрические размеры слитка (длина, высота, ширина); справочные данные по средне-

му сопротивлению деформации для используемого в расчетах материала; начальная и конечная температура прокатки; марка прокатываемого материала.

Программа предусматривает диалоговый режим работы на персональных компьютерах. В начале диалога программа запрашивает у пользователя информацию о марке сплава, для которого ведутся расчеты, и догружает либо модуль «ST2800», либо «STDUO800» – в зависимости от свойств выбранного материала и необходимости выбора соответствующего оборудования. Предусмотрена также возможность загрузки параметров используемого прокатного стана. Выходная информация выдается в виде таблицы расчета режима обжатий [2]. Программа рассчитана на работу со сплавами М1, М2, Л63, Л68, Л90, МН19, БрА7, Н1, Н2, Н3, Д1, Д16, АД1, АД31, АМЦ, АМгб и др.

В процессе работы программы на экран монитора выдаются сообщения о выполняемых операциях и запросы необходимых исходных данных. Все данные, полученные в результате расчетов, выдаются на экран монитора или печатающее устройство. Время подготовки исходной информации – до 60 минут. Время расчетов на ЭВМ, в зависимости от количества проходов, от 20 до 60 минут. В программе предусмотрена имитационная модель процесса прокатки, позволяющая представить динамический режим работы прокатного стана.

Алгоритмы расчета режима обжатий

В зависимости от марки выбранного материала в программе предусмотрено два алгоритма расчета режимов обжатий.

Алгоритм «STDUO800» предназначен для расчета режимов обжатий при прокатке мягких сплавов типа Л63, Л90, М1, Н1, АД1, АМц и других, способных выдерживать большие степени деформации без образования дефектов. Так как их пластичность достаточно высока, то расчеты ведут по следующим ограничивающим параметрам: угол захвата, момент и усилие прокатки.

Алгоритм «STDUO800» включает в себя выполнение следующих процедур:

1. Расчет высоты заготовки:

$$h_i = h_{i-1} - \Delta h_i.$$

2. Расчет коэффициента вытяжки:

$$\lambda_i = \frac{h_{i-1}}{h_i}.$$

3. Определение средней скорости деформации:

$$\bar{U}_i = \frac{\omega_i}{h_{i-1}} \sqrt{R\Delta h_i},$$

где ω_i – угловая скорость вращения валков, R – радиус валков.

4. Расчет геометрического фактора зоны деформации:

$$z_i = \sqrt{\frac{R\Delta h_i}{h_{i-1} \cdot h_i}}.$$

5. Расчет среднего давления прокатки:

$$p_i = 1,15\bar{k} \cdot 0,32 \left(1 + \frac{1}{z_i} + 1,25z_i \right),$$

где \bar{k} – среднее сопротивление деформации.

6. Расчет усилия прокатки:

$$P_{np.i} = p_i \cdot b \sqrt{R\Delta h_i},$$

где b – ширина полосы.

7. Определение коэффициента плеча положения равнодействующей производится по формуле, полученной аппроксимацией графической информации [2].

В области $z_i < 1,5$ эта зависимость представлена полиномом четвертой степени:

$$\psi_n = 0,4915 + 0,518z - 0,7068z^2 + 0,258z^3 - 0,02z^4.$$

В области $z > 1,5$ функцией

$$\psi_n = \frac{0,1z_i}{-0,285219 + 0,37066z_i}.$$

8. Расчет момента прокатки:

$$M_{np.i} = 2P_{np.i} \cdot \psi_n \sqrt{R\Delta h_i}.$$

9. Расчет длины заготовки после прокатки:

$$L_i = L_{i-1} \cdot \lambda_i.$$

10. Расчет температуры полосы по формуле Шадрина:

$$t_i = t_{i-1} - \frac{m_i \cdot S_i \cdot \tau_i}{G \cdot c},$$

где m – коэффициент, учитывающий потери тепла на 1 м^2 полосы, считываемый из базы данных; S – средняя поверхность полосы:

$$S_i = h_{i-1} \cdot b_{i-1} + b_{i-1} \cdot L_{i-1} + h_{i-1} \cdot L_{i-1} + h_i \cdot b_i + b_i \cdot L_i + h_i \cdot L_i,$$

τ_i – время прокатки

$$\tau_i = \frac{L_i}{w_i \cdot R} + \tau_{нз},$$

$\tau_{нз}$ – минимальная расчетная пауза;

G – масса слитка

$$G = V \cdot \gamma = h \cdot b \cdot l \cdot \gamma,$$

γ – плотность материала; c – удельная теплоемкость металла.

11. Расчет толщины полосы, при достижении которой следует переходить к расчетам по условию ровности:

$$h_{ров} = \frac{P_{дн} - 0,37w}{K(Y_k / h_k)},$$

где K – коэффициент жесткости профиля валков; w – профилировка валков с учетом температурного расширения; Y_k – разнотолщинность готовой полосы; h_k – конечная толщина полосы; $P_{дн}$ – допустимое усилие стана.

12. Расчет усилия по условию ровности

$$P_p = (K \cdot Y_k / h_k) h_i + 0,37 \cdot w \cdot K.$$

Алгоритм «ST2800» предназначен для расчета режима обжатий при прокатке твердых сплавов типа Д1, Д16, БрА7, деформация которых существенно ограничена условием пластичности. Поэтому расчеты ведут, исходя из этого условия по углу захвата, моменту и усилию прокатки.

Алгоритм «ST2800» включает в себя выполнение определенных процедур.

1. Определение коэффициента вытяжки по следующим формулам.

Для алюминиевых сплавов:

$$\text{при } \Lambda_{i-1} \leq 1,25 \quad \lambda_i = \frac{\Lambda_{i-1}}{0,471295 + 0,442057 \Lambda_{i-1}};$$

$$\text{при } \Lambda_{i-1} > 1,25 \quad \lambda_i = \frac{1}{1,13661 + (-0,255668)\Lambda_{i-1}}.$$

Для бронз:

$$\text{при } \Lambda_{i-1} \leq 1,25 \quad \lambda_i = \frac{\Lambda_{i-1}}{0,471295 + 0,442057\Lambda_{i-1}};$$

$$\text{при } \Lambda_{i-1} > 1,25 \quad \lambda_i = \frac{1}{1,13661 + (-0,255668)\Lambda_{i-1}},$$

где Λ – суммарная вытяжка.

2. Расчет обжатия, допускаемого условием пластичности;

$$\Delta h_i = h_{i-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda_i} \right).$$

3. Расчет высоты заготовки по формуле п. 1 предыдущего алгоритма.

4. Расчет средней скорости деформации, геометрического фактора зоны деформации, среднего давления прокатки, силы и момента прокатки, длины заготовки (см. предыдущий алгоритм).

5. Расчет продолжительности прохода.

6. Определение времени контактирования металла с валками:

$$\delta \tau_i = \frac{\sqrt{R \delta h_i}}{w_i R} + \tau_{nz}.$$

7. Расчет изменения температуры полосы:

$$-\delta \tau_i = f(t_{i-1}) \frac{2\tau_i}{h_i} + 56 f(5,23 \delta \tau_i) (t_i - t_{\text{расч}}) \frac{\sqrt{R \Delta h_i}}{w_i R} - 4,7 k_i \ln \lambda_i,$$

где $f(t_{i-1})$ – функция, значение которой определяется по формуле, полученной аппроксимацией графика из [2] (для алюминиевых сплавов):

$$\text{при } t_i \leq 405 \text{ } ^\circ\text{C} - f(t_{i-1}) = -2,14592 + 2,529112 \cdot 10^{-10} \cdot t_i;$$

$$\text{при } t_i > 405 \text{ } ^\circ\text{C} - f(t_{i-1}) = -31,4 + 0,089 t_i;$$

$t_{\text{расч}}$ – расчетная усредненная температура окружающего пространства; $f(5,23 \delta \tau_i)$ – функция Иванцова, значение которой считывается из базы данных и определяется методом интерполяции [2]; k_i – среднее сопротивление деформации; i – номер прохода.

8. Расчет температуры полосы после прохода:

$$t_i = t_{i-1} - \delta t_i.$$

9. Определение толщины полосы, при достижении которой переходят к расчетам по условию ровности.

10. Расчет усилия по условию ровности (см. п. 12 предыдущего алгоритма).

Пример расчета режима обжатий для прокатки на стане 2800

Исходные данные: сплав АМГ6, начальная температура прокатки $T_n = 460$ °С, конечная температура прокатки $T_k = 350$ °С, размеры слитка $175 \times 2120 \times 1375$ мм, толщина листа 6 мм.

Процедура расчета режима обжатий в программе ROLLING состоит из следующих этапов:

- выбор сплава (рис. 2.2);
- выбор прокатного стана с возможностью корректировки его параметров (рис. 2.3);

M1	M2	BrA7	
L63	MH19		ДРУГИЕ НА ОСНОВЕ МЕДИ
L68	L90		
-----T-----			
n1	n2	n3	КОНТРОЛЬНЫЙ ПРИМЕР

d1	d16		
AD1	AMЦ		ДРУГИЕ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ
AD31	AMГ6		

Рис. 2.2. Окно программы для выбора марки сплава (металла)

ВЫ СОГЛАСНЫ С ПАРАМЕТРАМИ СТАНА (Y/N) ?	
Максимальная угловая скорость, рад/с	7.90
Минимальная расчетная пауза, с:	4.0
Диаметр валков, мм:	750.0
Длина бочки валка, мм:	2800.0
Допускаемая сила, МН:	20.000
Допускаемый момент, МН*М:	1.550
Коэффициент жесткости валков, МН/мм:	100.00
Профилировка валков, мм:	0.27
Расчетная усредненная температура окружающего пространства, С:	40.0

Рис. 2.3. Окно программы для корректировки параметров прокатного стана

- ввод параметров технологического процесса, прокатываемого листа (рис. 2.4) и слитка (рис. 2.5);
- расчет технологических параметров по проходам (рис. 2.6);
- вывод результатов расчета параметров прокатки на экран и при необходимости на принтер в виде таблицы (рис. 2.7).

ВЫ ПРАВИЛЬНО ВВЕЛИ ПАРАМЕТРЫ (Y/N) ?	
Конечная толщина, мм:	6.0
Разнотолщинность, мм:	0.05
Начальная темп-ра, С:	460
Конечная темп-ра, С:	350
Плотность мат-ла, Кг/м ³ :	2700
Удельная тепл-ть, Ккал/ (Кг*гр)	0.22

Рис. 2.4. Ввод параметров прокатки и размеров листа

ВЫ ПРАВИЛЬНО ВВЕЛИ ПАРАМЕТРЫ (Y/N) ?	
Высота, мм:	175
Ширина, мм:	2120
Длина, мм:	1375

Рис. 2.5. Ввод размеров заготовки

ПРОХОД: 3		РЕЗУЛЬТАТЫ 2-го ПРОХОДА	
Скорость вращения валков W(рад/с):	1.63	Относительное обжатие dh, мм:	4.27
Коэффициент вытяжки:	1.04	Высота заготовки:	167.29 мм
Средняя скорость деформации U(1/с):	0.49	Сила, МН - 9.093	
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА (К, МПа) ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 448.1 гр.С, ВВЕДИТЕ:		Момент, МН*М - 0.421	
Величайшую/меньшую температуру по графикам:	440	Соппротивление деформации, МПа:	60.6
и сопротивлений деформации при этой температуре, МПа:	66	Высота слитка, при которой наступает условная равновесие:	12.0 мм
Величайшую/большую температуру по графикам:	460		
и сопротивлений деформации при этой температуре, МПа:	64	Температура полосы:	448.1 градусов Цельсия
СЛИТОК:		ПАРАМЕТРЫ СТАНА:	
Высота, мм:	175.0	Начальная, С:	460.0
Ширина, мм:	2120.0	Конечная, С:	350.0
Длина, мм:	1375.0	Конечная толщина полосы, мм:	6.0
		Допускаемая сила, МН:	20.00
		Допускаемый момент, МНМ:	1.55
		Сплав:	AMr6

Рис. 2.6. Окно программы с текущими результатами расчетов

Проход	Высота Н1-1мм	Высота Н1, мм	Обжатие dН, мм	Выгибная сушеарж	Тем-ра гр.С	Угл.ск град/с	Сопр.деф МПа	Время сек	Удлинен МН	Модуль МН*М
1	175.00	171.57	3.43	1.02	460.0	1.6	60.0	6.29	8.891	0.3640
2	171.57	167.29	4.27	1.05	454.2	1.6	60.6	6.34	9.093	0.4207
3	167.29	160.66	6.63	1.09	448.1	1.6	65.2	6.42	10.296	0.6068
4	160.66	150.75	9.91	1.16	441.1	1.7	71.8	6.55	12.002	0.8795
5	150.75	136.76	13.99	1.28	433.4	1.7	82.8	6.79	14.701	1.2878
6	136.76	120.16	16.60	1.46	425.0	2.1	89.7	6.54	16.304	1.5433
7	120.16	103.86	16.30	1.68	418.5	2.8	95.4	6.21	16.712	1.5457
8	103.86	88.36	15.50	1.98	414.1	3.2	104.5	6.27	17.568	1.5486
9	88.36	72.86	15.50	2.40	410.9	3.9	109.2	6.26	18.298	1.5362
10	72.86	57.56	15.30	3.04	409.3	4.8	117.2	6.32	19.977	1.5308
11	57.56	44.76	12.80	3.91	409.3	5.7	123.2	6.52	19.913	1.2624
12	44.76	34.26	10.50	5.11	409.3	6.5	129.0	6.88	19.913	1.0905
13	34.26	25.76	8.50	6.79	409.3	7.2	133.0	7.46	19.871	0.8719
14	25.76	19.16	6.60	9.13	409.3	7.8	138.7	8.47	19.880	0.8133
15	19.16	14.06	5.10	12.45	408.7	7.6	143.0	10.01	19.959	0.6624
16	14.06	10.26	3.80	17.06	403.9	7.7	148.6	12.18	19.961	0.5386
17	10.26	7.96	2.30	21.99	393.2	7.7	152.4	14.50	16.307	0.3387
18	7.96	6.36	1.60	27.52	375.6	7.7	156.0	17.10	14.500	0.2469
19	6.36	6.00	0.36	29.17	354.9	7.7	121.3	17.89	3.712	0.0372

Рис. 2.7. Изменение параметров прокатки по проходам

Контрольные задачи

Номер задания	Условия задачи	Материал изделия	Дополнительные условия
1	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 10 мм из слитка размерами 250 × 2 000 × 2500 мм	АМг6	$T_H = 460\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 350\text{ }^\circ\text{C}$
2	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 10 мм из слитка размерами 150 × 1 500 × 2 000 мм	АМг6	$T_H = 460\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 350\text{ }^\circ\text{C}$
3	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 12 мм из слитка размерами 400 × 600 × 1 300 мм	М1	$T_H = 950\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 600\text{ }^\circ\text{C}$
4	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 5 мм из слитка размерами 150 × 2 100 × 1 300 мм	АМц	$T_H = 460\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 350\text{ }^\circ\text{C}$
5	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 6 мм из слитка размерами 200 × 675 × 1 300 мм	Л90	$T_H = 900\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 550\text{ }^\circ\text{C}$
6	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 3 мм из слитка размерами 100 × 2 120 × 1 375 мм	Д16	$T_H = 450\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 300\text{ }^\circ\text{C}$
7	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 4 мм из слитка размерами 100 × 2 120 × 1 375 мм	Л68	$T_H = 750\text{ }^\circ\text{C}$; $T_K = 300\text{ }^\circ\text{C}$

8	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 2 мм из слитка размерами 50 × 500 × 1 500 мм	АД1	$T_H = 430 \text{ }^\circ\text{C};$ $T_K = 320 \text{ }^\circ\text{C}$
9	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 5 мм из слитка размерами 50 × 500 × 1 500 мм	АД31	$T_H = 500 \text{ }^\circ\text{C};$ $T_K = 420 \text{ }^\circ\text{C}$
10	Рассчитать режим обжатий при горячей прокатке листа толщиной 5 мм из слитка размерами 100 × 500 × 1 000 мм	Н1	$T_H = 950 \text{ }^\circ\text{C};$ $T_K = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2. САПР технологии горячей сортовой прокатки двутавровых профилей из сталей (САПР VALKA)

Данная система автоматизированного проектирования была разработана при создании комплексной САПР сортовой прокатки, методология которой изложена в работе [6]. Ее использование позволяет проводить анализ формоизменения металла и энергосиловых параметров при сортовой прокатке стальных балок различных номеров на последовательных и непрерывных прокатных станах.

Общая структура алгоритма и исходные данные для расчетов

Расчет калибровки валков проводится на основе разработанной математической модели, полученной в результате теоретических и экспериментальных исследований процесса прокатки в балочных калибрах [1; 2]. Для практических расчетов создана программа, позволяющая в диалоговом режиме проектировать калибровку валков для прокатки двутавровых профилей. Алгоритм программы (рис. 2.8) включает формирование исходных данных, составление схемы калибровки (модули 2–4), расчет формоизменения металла и размеров калибров (модули 6–15), определение скоростного режима прокатки, температуры раската и энергосиловых параметров в каждом проходе (модули 18–26), проверку ограничений режимов деформации и корректировку рассчитанной калибровки (модули 28–30).

В качестве исходных данных для расчетов используется следующая информация [1]: техническая характеристика стана (табл. 2.1), номер балки N и размеры чистового профиля B , H и др.; марка прокатываемой стали, начальная температура прокатки.

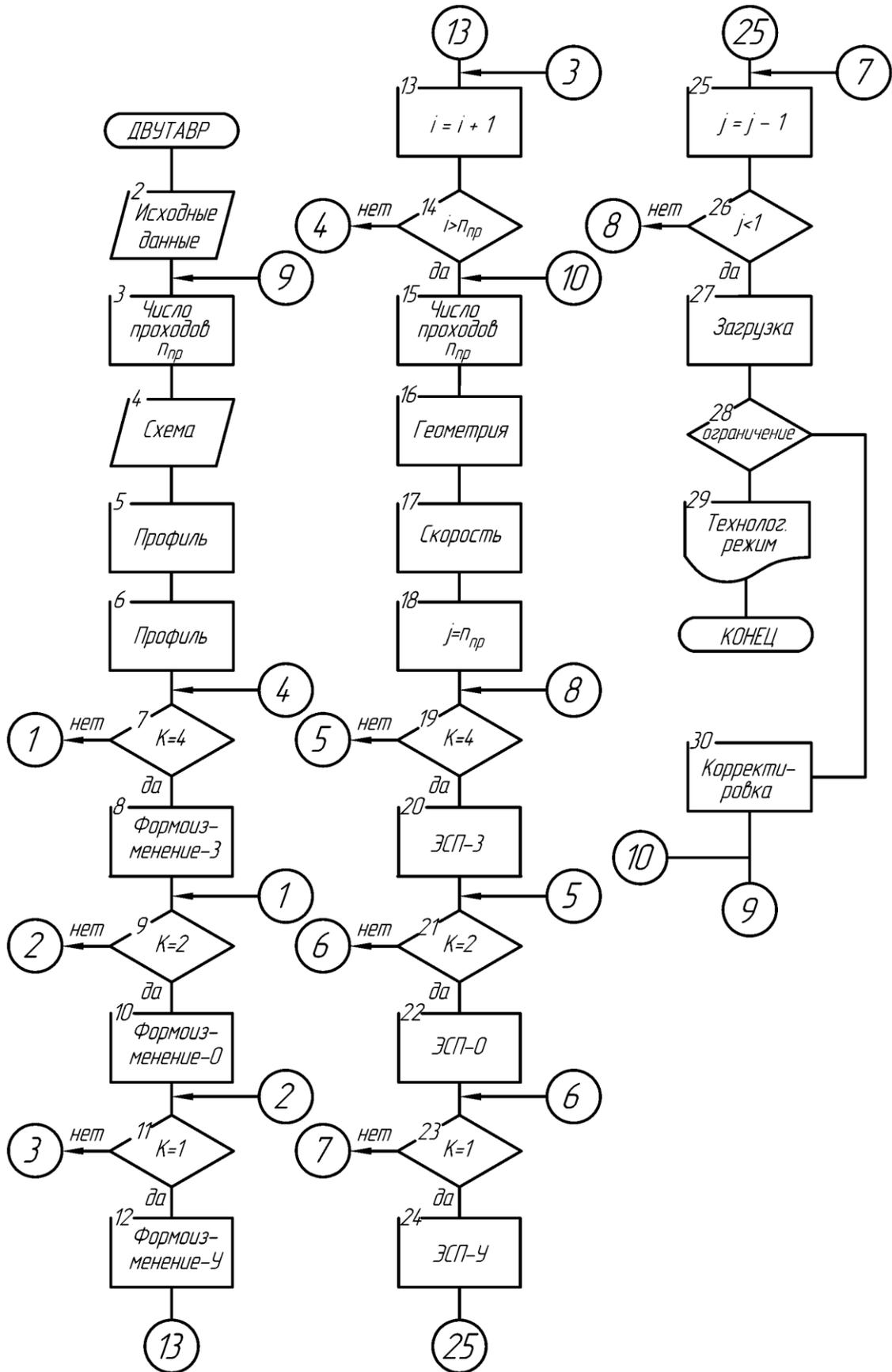


Рис. 2.8. Блок-схема алгоритма программы BALKА

Таблица 2.1

Техническая характеристика прокатного стана

Характеристика	Клеть			
	1-я	2-я	...	<i>n</i> -я
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	N_{H1}	N_{H2}	...	N_{Hn}
Допустимое усилие на шейку валка, кН	$P_{\partial 1}$	$P_{\partial 2}$...	$P_{\partial n}$
Допустимый крутящий момент прокатки, кНм	$M_{\partial 1}$	$M_{\partial 2}$...	$M_{\partial n}$
Передаточное число редуктора	i_{p1}	i_{p2}	...	i_{pn}
Коэффициент полезного действия привода	η_1	η_2	...	η_n
Номинальная частота вращения валков, об/мин	n_{H1}	n_{H2}	...	N_{Hn}
Расстояние от опоры валка до вертикальной оси калибра, м	x_1	x_2	...	x_n
Расстояние между опорами валка, м	a_1	a_2	...	a_n
Минимально допустимая частота вращения валков, об/мин	$n_{\min 1}$	$n_{\min 2}$...	$n_{\min n}$
Максимально допустимая частота вращения валков, об/мин	$n_{\max 1}$	$n_{\max 2}$...	$n_{\max n}$
Начальный диаметр валков, мм	D_{01}	D_{02}	...	D_{0n}
Расстояние между клетями, м	L_1	L_2	...	L_n

Вначале в модуль 2 вводят данные о технической характеристике стана, остальную информацию вводят по ходу работы программы в процессе диалога пользователя с ЭВМ. На первом этапе этого диалога ЭВМ рассчитывает число проходов в балочных калибрах

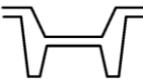
$$n_{\text{пр}} = 2 + 1,324N^{0,558},$$

после чего пользователь по ее запросу составляет и вводит с клавиатуры схему калибровки в цифровых кодах (табл. 2.2). Затем в модуле «Профиль» рассчитываются горячие размеры числового профиля с учетом допусков и определяются размеры чистового калибра, после чего начинается расчет формоизменения металла по описанным в работах [6] алгоритмам. Далее ведется расчет температурно-скоростных и энергосиловых параметров прокатки, проверка ограничений и корректировка.

Последовательность расчетов подробно изложена в работе [2].

Таблица 2.2

Коды калибров

Наименование калибра	Условное обозначение	Код калибра
Универсальный		1
Открытый балочный		2
Контрольный		3
Закрытый балочный		4
Гибочный		5

Пример расчета калибровки валков для прокатки балки № 16 на стане 500

Предлагаемый алгоритм поясняется примером расчета калибровки валков для прокатки балки № 16 (ГОСТ 8239–89) на последовательном стане 500 (рис. 2.9). Размеры балки составляют, мм: $H = 160$; $B = 81$; $d = 5$; $t = 7,8$; $R = 8,5$; $r = 3,5$.

При заданном номере балки 16 количество проходов

$$n_{\text{пр}} = 2 + 1,324N^{0,558} = 2 + 1,324 \cdot 16^{0,558} = 8,2.$$

С учетом разрезного калибра принимаем количество проходов 9.

Рассчитаем горячие размеры чистового профиля и соответствующего ему калибра, если ориентировочная температура прокатки равна 950°C :

$$B = (160 - 0,7 \cdot 2,5) \left(1 + 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 950\right) = 160 \text{ мм};$$

$$H = (81 - 0,7 \cdot 2,5) \left(1 + 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 950\right) = 80,2 \text{ мм};$$

$$d = 5 \left(1 + 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 950\right) = 5,1 \text{ мм};$$

$$t = (7,8 - 0,7 \cdot 0,47) \left(1 + 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 950\right) = 7,6 \text{ мм};$$

$$a = t - \frac{(H_{\phi} - d)}{4} \text{tg}\varphi_{\phi} = 7,6 - \frac{80,2 - 5,1}{4} 0,12 = 5,3 \text{ мм};$$

$$b = t + \frac{(H_\phi - d)}{4} tg\varphi_\epsilon = 7,6 + \frac{80,2 \cdot 5,1}{4} 0,12 = 9,8 \text{ мм};$$

$$B_{\text{ш}} = B - 2b = 160 - 2 \cdot 9,8 = 140,4 \text{ мм}.$$

Радиусы закругления R и r на горячие размеры не пересчитывают. Для расчета радиусов в других проходах найдем отношения $C_1 = R/b = 0,867$ и $C_2 = r/a = 0,66$.

Зная размеры чистового профиля, рассчитаем размеры полосы, задаваемой в первый калибр. При этом последовательность калибров выберем следующую: универсальный балочный, открытый балочный, шесть закрытых балочных и закрытый разрезной калибры.

В принятой схеме кодировки (см. табл. 2.2) это выразится записью $21 \rightarrow 42 \rightarrow 44 \rightarrow 44 \rightarrow 44 \rightarrow 44 \rightarrow 44 \rightarrow 44 \rightarrow 44$.

Рассчитаем величины обжатий:

$$\begin{aligned} 1/\eta_d &= 1,052 - 5,33 \cdot 10^{-4} N + 0,061 N_{\kappa\bar{o}} + 3,82 \cdot 10^{-4} N_{\kappa\bar{o}}^2 - 1,04 \cdot 10^{-3} N \cdot N_{\kappa\bar{o}} = \\ &= 1,052 - 5,33 \cdot 10^{-4} \cdot 16 + 0,061 \cdot 1 + 3,82 \cdot 10^{-4} \cdot 1 - 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 1 = \\ &= 1,0918; \end{aligned}$$

$$1/\eta_t = m_0(1/\eta_d) = 1,02 \cdot 1,0918 = 1,1136;$$

$$1/\eta_a = (1 - mN_{\kappa\bar{o}})(1/\eta_t) = (1 - 0,01 \cdot 1)1,1136 = 1,1025;$$

$$1/\eta_\epsilon = (1 + mN_{\kappa\bar{o}})(1/\eta_t) = (1 + 0,01 \cdot 1)1,1136 = 1,1248.$$

Тогда размеры поступающей в калибр полосы будут равны:

$$d' = (1/\eta_d)d = 1,0918 \cdot 5,1 = 5,6 \text{ мм};$$

$$a' = (1/\eta_a)a = 1,1025 \cdot 5,3 = 5,8 \text{ мм};$$

$$b' = (1/\eta_\epsilon)b = 1,1248 \cdot 9,81 = 11,0 \text{ мм};$$

$$t' = (1/\eta_t)t = 1,1136 \cdot 7,6 = 8,5 \text{ мм};$$

$$\epsilon_\phi = \frac{t' - t}{t'} = \frac{8,5 - 7,6}{8,5} = 0,106;$$

$$\epsilon_{\text{ш}} = \frac{d' - d}{d'} = \frac{5,6 - 5,1}{5,6} = 0,089;$$

$$\Delta B_{cp} = 2,54(t' - t) \frac{\epsilon_\phi - \epsilon_{\text{ш}}}{\epsilon_\phi} = 2,54(8,50 - 7,6) \frac{0,106 - 0,089}{0,106} = 0,4 \text{ мм};$$

$$H'_\phi = H_\phi - \Delta B_{cp} = 80,2 - 0,4 = 79,8 \text{ мм};$$

$$h = 0,5 \cdot 79,8 = 39,9 \text{ мм}.$$

Примем уширение стенки профиля $\Delta B_m = 0,4$ мм, тогда ширина полосы

$$B' = B_m - \Delta B_m + 2b' = 140,4 - 0,4 + 2 \cdot 11,0 = 162,2 \text{ мм}.$$

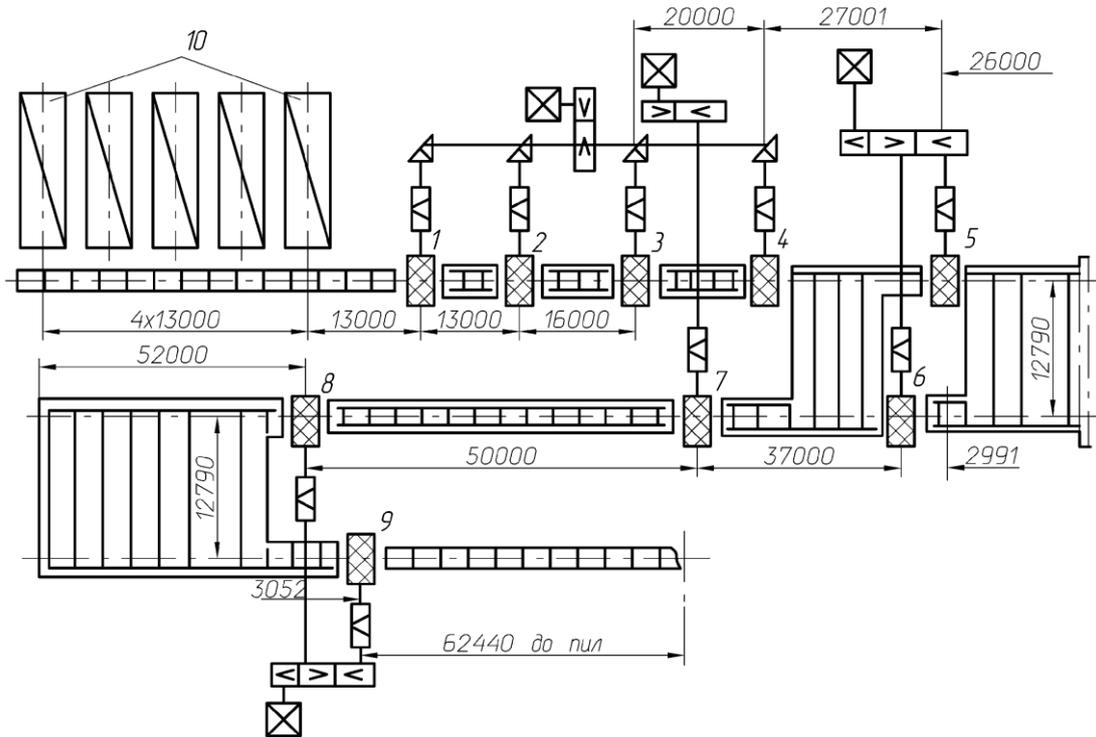


Рис. 2.9. Схема расположения оборудования стана 500:
1–9 – номера рабочих клеток; 10 – нагревательные

Выпуск наружных граней во втором калибре определим, приняв одинаковыми уклоны внутренних граней фланцев в чистовом и предчистовом калибрах ($\text{tg}\phi'_e = \text{tg}\phi_e = 0,12$):

$$\text{tg}\phi_n = \frac{b' - a' - 0,5(H'_\phi - d')\text{tg}\phi'_e}{0,5(H'_\phi - d')} = 0,02.$$

Радиусы закруглений определим из постоянства величин C_1 и C_2 для всех калибров:

$$R' = C_1 b' = 0,867 \cdot 11,0 = 9,5 \text{ мм}; \quad r' = C_2 \cdot a' = 0,66 \cdot 5,8 = 4 \text{ мм}.$$

Определим размеры следующего против хода прокатки открытого калибра.

При $N_{\text{кб}} = 2$ для балки 16 ($N = 16$) найдем величины обжатия:

$$1/\eta_a = 1,052 - 5,33 \cdot 10^{-4} N + 0,061 N_{\text{кб}} + 3,82 \cdot 10^{-4} N_{\text{кб}}^2 - 1,04 \cdot 10^{-3} N N_{\text{кб}} = 1,1476;$$

$$1/\eta_{3a} = 0,890 - 3,07 \cdot 10^{-4} N + 0,418 N_{\text{кб}} - 1,54 \cdot 10^{-5} N_{\text{кб}}^3 - 3,68 \cdot 10^{-4} N N_{\text{кб}} = 0,9568;$$

$$1/\eta_{3e} = 0,979 - 2,24 \cdot 10^{-4} N + 0,0505 N_{\text{кб}} - 1,45 \cdot 10^{-4} N_{\text{кб}}^3 - 3,2 \cdot 10^{-4} N N_{\text{кб}} = 1,065;$$

$$\Delta B / \Delta d = -1,37 + 0,0573 N + 6,591 N_{\text{кб}}^{-1} = 2,8.$$

Тогда размеры профиля в третьем калибре составят:

$$d' = (1/\eta_a) d = 1,1476 \cdot 5,6 = 6,4 \text{ мм};$$

$$a' = (1/\eta_a)a = 0,9568 \cdot 5,8 = 5,6 \text{ мм};$$

$$b' = (1/\eta_b)b = 1,065 \cdot 11 = 11,8 \text{ мм};$$

$$\Delta B = (d' - d)(\Delta B / \Delta d) = (6,4 - 5,6)2,8 = 2,2 \text{ мм};$$

$$B' = B - \Delta B = 162,2 - 2,2 = 160,0.$$

В соответствии с алгоритмом определим безразмерные параметры, рассчитаем коэффициент утяжки фланцев и определим высоту фланцев в третьем калибре:

$$A = \frac{D_0 - d}{d} = \frac{470 - 5,6}{5,6} = 82,9; \quad f_3 = \frac{h_3}{d} = \frac{39,9}{5,6} = 7,125;$$

$$t_{3\phi} = \frac{b_3}{d} = \frac{11,0}{5,6} = 1,96; \quad B_k = \frac{B}{2d} = \frac{162,2}{2 \cdot 5,6} = 14,48;$$

$$1/\eta_a = 1,095; \quad h' = (1/\eta_a)h = 1,095 \cdot 39,9 = 43,7 \text{ мм}.$$

Определим свободное уширение по формулам:

$$\beta_{c\phi} = 1 + 1,08(1/\eta_d - 1)(1/\eta_a)^{-0,804} \Lambda^{-0,262} (c/f^2 t_0)^{0,269} (tg\phi_\phi)^{0,806} \times$$

$$\times [1 + 8,34(1/\eta_\phi - 1)] = 1,0108;$$

$$\gamma_{cm} = \frac{\Delta B}{\Delta B_{c\phi}} = \frac{\Delta B}{B'(\beta_{c\phi} - 1)} = \frac{162,2 - 160}{160(1,0108 - 1)} = 1,294.$$

Поскольку полученное значение больше максимально допустимого для открытых калибров, т. е. $\gamma_{ct} > [\gamma_{ct}] = 0,885$, то примем $\Delta B_{ct} = 0,885\Delta B_{c\phi} = 1,5 \text{ мм}$.

Примем выпуск наружных граней третьего калибра (закрытого) равным 0,02 и проверим ограничения по условиям входа раската в калибр:

$$\Delta B_{cm} = 1,5 \leq b - a' - (h' - 0,5d')tg\phi'_n = 11 - 5,6 - (43,7 - 3,2)0,02 = 4,6 \text{ мм}$$

Так как первое ограничение выполняется, то проверим второе:

$$\Delta B_{cm} = 1,5 \geq 2h'tg\phi'_n - (d - s)tg\phi_n = 2 \cdot 43,7 \cdot 0,02 - (5,6 - 4)0,02 = 1,7 \text{ мм},$$

т. е. условие не выполняется. Примем окончательно уширение $\Delta B = 1,7 \text{ мм}$ и определим ширину полосы в 3-м калибре:

$$B' = B - \Delta B = 162,2 - 1,7 = 160,5 \text{ мм}.$$

Радиусы закругления в этом калибре:

$$R' = C_1 \cdot b' = 0,867 \cdot 11,8 \cong 10 \text{ мм}; \quad r' = C_2 \cdot a' = 0,66 \cdot 5,6 \cong 4 \text{ мм}.$$

Поскольку 4-й калибр является закрытым, то расчет следует вести по соответствующему алгоритму.

При $N_{кб} = 3$ и $N = 16$ найдем величины обжатия:

$$1/\eta_d = 1,052 - 5,33 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,061 \cdot N_{кб} + 3,82 \cdot 10^{-4} \cdot N_{кб}^2 - 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot N_{кб} = 1,211;$$

$$1/\eta_{oa} = 1,061 - 0,0021 \cdot N + 0,112 \cdot N_{кб} - 4,08 \cdot 10^{-4} \cdot N_{кб}^3 - 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot N_{кб} = 1,326;$$

$$1/\eta_{ob} = 1,021 - 0,0012 \cdot N + 0,0813 \cdot N_{кб} - 3,66 \cdot 10^{-4} \cdot N_{кб}^3 - 1,87 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot N_{кб} = 1,223;$$

$$1/\eta_{3a} = 0,890 - 3,07 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,0418 \cdot N_{\text{кб}} - 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot N_{\text{кб}}^3 - 3,68 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot N_{\text{кб}} = 0,992;$$

$$1/\eta_{3b} = 0,979 - 2,24 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,0505 \cdot N_{\text{кб}} - 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot N_{\text{кб}}^3 - 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot N_{\text{кб}} = 1,108;$$

$$\Delta B / \Delta d = -1,37 + 0,0573 \cdot N + 6,591 \cdot N_{\text{кб}}^{-1} = 1,774.$$

Рассчитаем размеры элементов профиля в 4-м калибре:

$$d' = (1/\eta_d)d = 1,211 \cdot 6,4 = 7,7 \text{ мм};$$

$$a'_3 = (1/\eta_{oa})a_0 = 1,326 \cdot 5,6 = 7,4 \text{ мм};$$

$$b'_3 = (1/\eta_{об})b_0 = 1,223 \cdot 11,8 = 14,4 \text{ мм};$$

$$a'_o = (1/\eta_{3a})a_3 = 0,992 \cdot 5,6 = 5,6 \text{ мм};$$

$$b'_o = (1/\eta_{3b})b_3 = 1,108 \cdot 11,8 = 13 \text{ мм};$$

$$\Delta B = (d' - d) \cdot (\Delta B / \Delta d) = (7,7 - 6,4) \cdot 1,744 = 2,3 \text{ мм};$$

$$B' = B - \Delta B = 160,5 - 2,3 = 158,2 \text{ мм}.$$

Определив безразмерные параметры, рассчитаем утяжку и приращение фланцев по приведенным формулам:

$$1/\eta_o = 1,096; 1/\eta_3 = 0,959.$$

Тогда высота открытого и закрытого фланца соответственно равны

$$h'_3 = (1/\eta_o)h = 1,096 \cdot 43,7 = 47,9 \text{ мм};$$

$$h'_o = (1/\eta_3)h = 0,959 \cdot 43,7 = 41,9 \text{ мм}.$$

Аналогично (как и для предыдущего калибра) определим коэффициент свободного уширения $\beta_{\text{св}} = 1,016$. Тогда свободное уширение и степень стеснения уширения будут рассчитаны следующим образом:

$$\Delta B_{\text{св}} = B'(\beta_{\text{св}} - 1) = 2,5 \text{ мм}; \gamma_{\text{ст}} = \Delta B / \Delta B_{\text{св}} = 0,88.$$

Определив среднестатистическое $\bar{\gamma}_{\text{см}} = 0,63 - 0,05N_{\text{кб}} = 0,48$ и максимальное $[\gamma_{\text{ст}}] = \bar{\gamma}_{\text{см}} + 0,42 = 0,9$ значения степени стеснения уширения, проверим соответствующее неравенство $\bar{\gamma}_{\text{см}} < \gamma_{\text{ст}} < [\gamma_{\text{ст}}]$, которое выполняется.

Проверим также ограничения по условиям входа раската в калибр, назначив при этом выпуски наружных стенок четвертого калибра ($\text{tg}\varphi_{\text{он}} = 0,05$, $\text{tg}\varphi_{\text{зн}} = 0,02$):

$$\Delta B = 2,3 \geq 2(h'_o \cdot \text{tg}\varphi'_{\text{он}} - h_o \cdot \text{tg}\varphi_{\text{он}}) = 2(47,9 \cdot 0,04 - 43,7 \cdot 0,02) = 2,1 \text{ мм};$$

$$\Delta B = 2,3 \geq 2(b_o - a'_3 - h'_3 \cdot \text{tg}\varphi'_{\text{зн}} - 0,5d_o \cdot \text{tg}\varphi_{\text{он}}) =$$

$$= 2(11,8 - 7,4 - 41,9 \cdot 0,02 - 0,5 \cdot 6,4 \cdot 0,02) = 7 \text{ мм}.$$

Следовательно, ограничения выполняются, поэтому примем $\Delta B = 2,3 \text{ мм}; B' = 158,2 \text{ мм}.$

Радиусы закругления в четвертом калибре: $R'_o = C_1 \cdot b'_o = 0,867 \cdot 13,0 \cong 11 \text{ мм}; R'_3 = C_1 \cdot b'_3 = 0,867 \cdot 14,4 \cong 12,5 \text{ мм}; r'_o = C_2 \cdot a'_o = 0,66 \cdot 5,6 \cong 4 \text{ мм}.$

Таблица 2.3

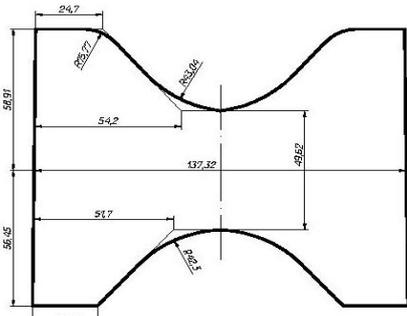
Размеры калибров по ходу прокатки балки № 16 на стане 500

Размеры элементов калибров, мм								Радиусы закруглений, мм			Выпуски калибров		Коэффициент вытяжки, λ
Толщина стенки, d	Высота фланцев		Толщина фланцев у основания		Толщина фланцев у вершины		Ширина стенки, B	R_0	R_3	r	открытого, $\text{tg}\varphi_0$	закрытого, $\text{tg}\varphi_3$	
	открытого, h_0	закрытого, h_3	открытого, b_0	закрытого, b_3	открытого, a_0	закрытого, a_3							
49,0	58,6	58,2	48,0	48,9	23,3	24,1	138,2	42,0	42,0	15,0	0,06	0,06	1,42
30,0	56,8	52,4	34,2	38,1	14,7	20,1	143,9	30,0	33,0	10,0	0,08	0,03	1,30
19,4	51,2	51,1	27,0	27,5	12,5	13,0	149,0	23,0	24,0	8,0	0,07	0,04	1,38
13,4	51,4	45,9	19,8	22,1	8,3	11,4	152,9	17,0	19,0	6,0	0,06	0,03	1,34
9,8	46,5	46,4	16,5	16,8	7,6	7,9	156,0	14,0	15,0	5,0	0,05	0,02	1,30
7,7	47,9	41,9	13,0	14,4	5,6	7,4	158,2	11,0	12,5	4,0	0,04	0,02	1,24
6,4	43,7	43,7	11,8	11,8	5,6	5,6	160,5	10,0	10,0	4,0	0,02	0,02	1,18
5,6	39,9	39,9	11,0	11,0	5,8	5,8	162,2	9,5	9,5	4,0	0,02	0,02	1,13
5,1	40,1	40,1	9,8	9,8	5,3	5,3	160,0	8,5	8,5	3,5	0,00	0,00	1,11

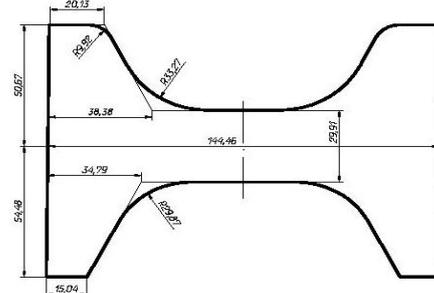
Таблица 2.4

Температурно-скоростные и энергосиловые параметры прокатки балки № 16 на стане 500

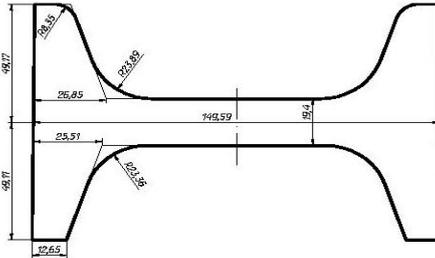
Диаметр валков D , мм	Скорость прокатки, м/с			Температура полосы, $T^{\circ}\text{C}$	Степень деформации ε	Сопротивление деформации σ , МПа	Коэффициент напряженного состояния n_{σ}	Площадь контактной поверхности F_k , мм ²	Усилия прокатки P , МН	Моменты деформации, КН·м		
	минимальная V_{min}	по калибровке V	максимальная V_{max}							общий M	открытый M_0	закрытый M_3
429,3	0,93	0,93	0,93	1125	0,33	71,2	1,14	13621,4	1,09	138,1	69,1	69,1
450,7	1,18	1,18	1,18	1110	0,26	69,9	1,06	13528,3	1,08	174,2	71,4	103
468,4	1,62	1,62	1,62	1095	0,30	80,1	1,12	12346,9	1,20	180,6	60,8	120
479,8	2,07	2,07	2,07	1077	0,27	85,8	1,16	10578,3	1,13	105,5	30,2	75,3
617,2	1,81	2,62	3,28	1052	0,25	89,8	1,22	9904,3	1,17	98,3	21,4	76,9
621,9	1,80	3,26	3,26	1028	0,21	95,5	1,23	8162,4	1,04	57,3	11,8	45,5
624,9	2,65	3,85	4,80	998	0,16	97,7	1,26	6187,3	0,82	41,8	6,28	35,5
626,8	2,50	4,34	5,15	960	0,12	98,6	1,27	3920,3	1,04	35,0	17,5	17,5
627,8	3,41	4,80	5,54	926	0,08	97,9	1,24	3028,9	0,94	–	–	–



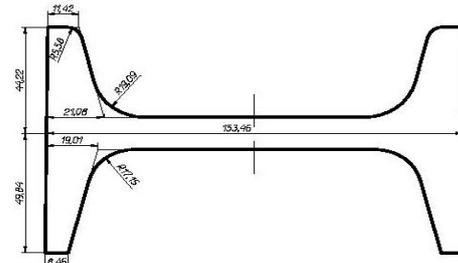
Балка N16 калибр 1



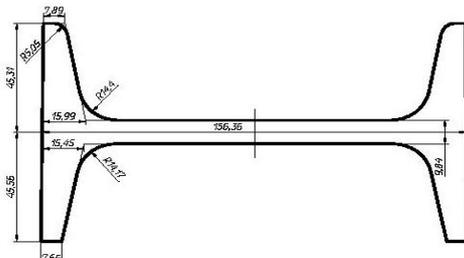
Балка N16 калибр 2



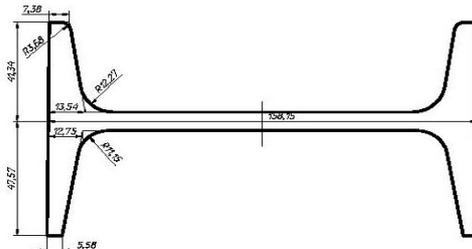
Балка N16 калибр 3



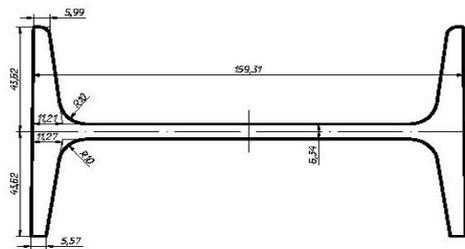
Балка N16 калибр 4



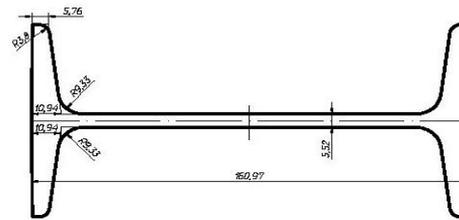
Балка N16 калибр 5



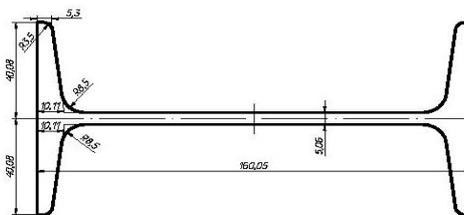
Балка N16 калибр 6



Балка N16 калибр 7



Балка N16 калибр 8



Балка N16 калибр 9

Рис. 2.10. Калибровка валков для прокатки балки № 16 на стане 500

Аналогично определяются размеры всех остальных калибров (табл. 2.3). Далее рассчитывают размеры заготовки, коэффициенты вытяжки и скоростной режим прокатки, а также энергосиловые параметры (табл. 2.4).

Графическое изображение калибровки валков (рис. 2.10) формируется программой и передается для образмеривания в графический пакет AutoCAD, а графики полученных расчетных параметров (рис. 2.11) могут быть построены с помощью средств пакета Excel.

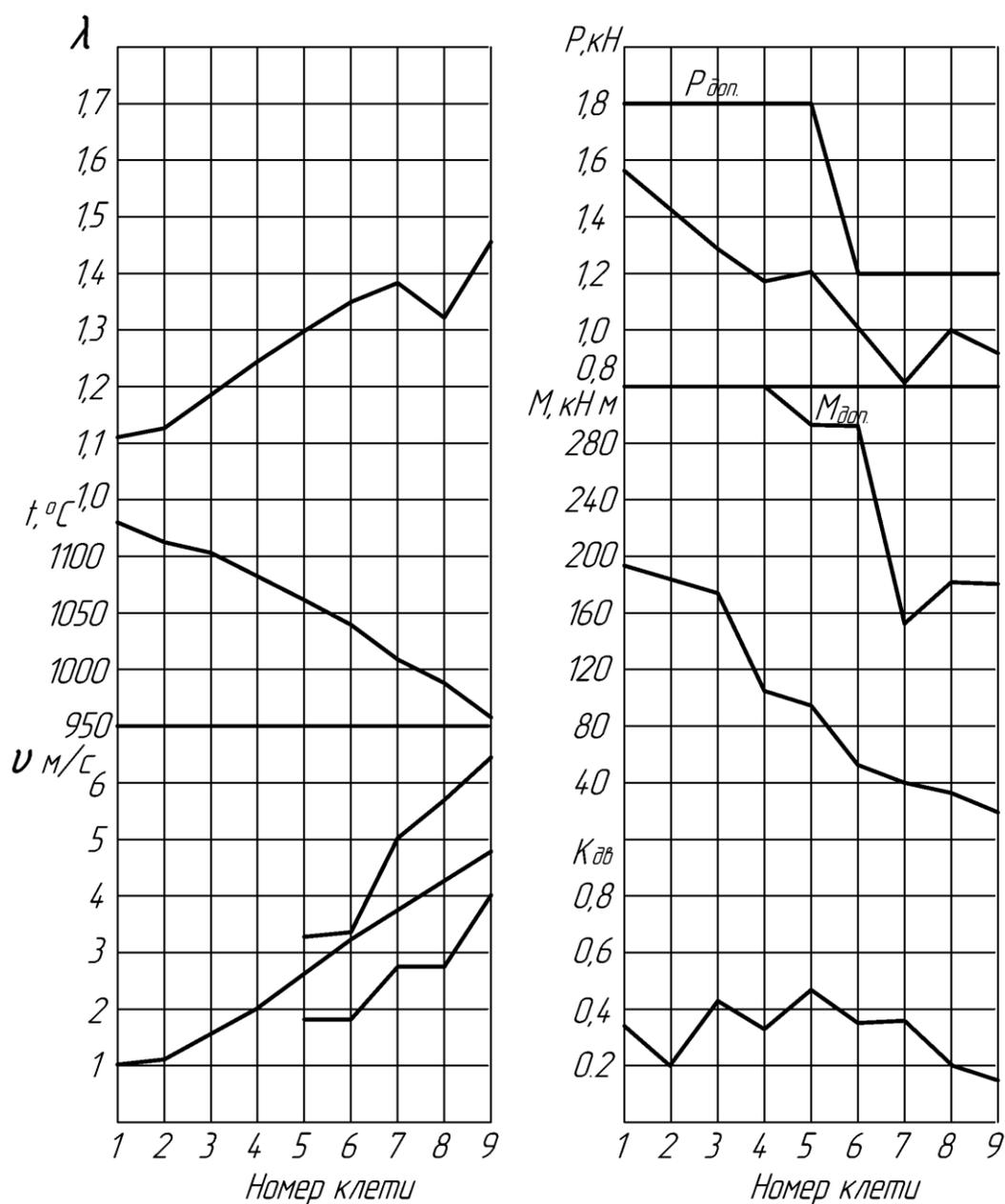


Рис. 2.11. Результаты расчета основных технологических и энергосиловых параметров при прокатке балки № 16 на последовательном стане 500

Контрольные задачи

Рассчитать технологические режимы прокатки балок согласно ГОСТ 8239–89, построить калибровки валков и графики расчетных параметров.

Номер задания	Условия задачи (№ балки)	Начальная температура прокатки, °С	Номер задания	Условия задачи (№ балки)	Начальная температура прокатки, °С
1	10	1 300	6	10	1 100
2	12	1 300	7	12	1 100
3	14	1 300	8	14	1 100
4	16	1 300	9	16	1 100
5	18	1 300	10	18	1 100

2.3. САПР технологии прессования алюминиевых сплавов (САПР INPRESS)

Общая структура алгоритма и исходные данные для расчетов

Разработанная система автоматизированного проектирования INPRESS [12] предназначена для проектирования инструмента и технологии прессования металлов. Структурная схема САПР INPRESS представлена на рис. 2.12. Она включает две основные подсистемы: подсистему проектирования инструмента и технологии для полунепрерывного прессования алюминиевых профилей и подсистему проектирования для непрерывного прессования.

Особенностью САПР является алгоритм создания чертежа нормали профиля и расчет его характеристик, причем блок программ, реализующий этот алгоритм, общий для обеих подсистем проектирования. Работа системы INPRESS осуществляется в режиме диалога через набор меню, панелей и окон, причем творческое участие конструктора в силу плохой формализуемости задач – одна из особенностей системы.

В качестве исходных данных используются координаты проектируемого профиля и его характеристики (удельный вес, марка сплава, группа сложности и др.). Блок ввода исходных данных разработан в виде графического редактора, позволяющего вводить в систему как цифровой, так и графический образ контура проектируемого профиля.



Рис. 2.12. Структурная схема системы проектирования INPRESS

Подготовка чертежа нормали профиля

Для создания чертежа (нормали) профиля формируют графическое изображение профиля либо с помощью пакета AutoCAD (при сложной конфигурации профиля), либо по координатным методом. Далее необходимо выполнить следующие процедуры:

- передать контур профиля с помощью интерфейсных программ из пакета AutoCAD в систему INPRESS1 либо ввести информацию по координатным способом;

- ввести точное наименование профиля (например, 411336, ПК18868, но не более восьми символов), группу сложности профиля,

данные о марке прессуемого алюминиевого сплава и, при необходимости, его удельный вес;

- проверить правильность ввода информации о профиле путем вывода его графического изображения на экран;

- с помощью блока типовых расчетов вычислить периметр, площадь, массу одного погонного метра и диаметр описанной окружности профиля;

- передать полученную расчетную и графическую информацию в пакет AutoCAD в специально созданные файлы с рамкой формата A3 или A4;

- скопировать и сохранить с новым именем в архиве файл для проектирования чертежа матрицы;

- проставить с помощью средств пакета AutoCAD все размеры, сформировать недостающие надписи;

- с помощью плоттера или принтера получить твердую копию чертежа профиля;

- сохранить полученный чертеж, для чего сделать его архивную копию.

Подготовка чертежа матрицы

Для создания чертежа матрицы нужно выполнить ряд процедур:

- восстановить из архива файл с графическим изображением контура профиля либо ввести его вновь с использованием описанных выше возможностей;

- разместить контур профиля на зеркале матрицы с учетом условия выравнивания скоростей истечения металла по элементам профиля;

- в случае многоканального прессования после размещения профиля в заданной половине (четверти) осуществить тиражирование контура для 2- или 4-канального варианта;

- назначить припуски на размер канала матрицы, при этом возможно назначение 1 % припуска на все размеры (автоматическое) или выборочное назначение на отдельные размеры профиля (ручное) с последующей корректировкой;

- рассчитать калибрующие пояски в любой точке профиля, для чего необходимо отметить заданные точки на контуре профиля и назначить величину минимального пояска;

- построить развертку поясков в виде графического изображения и передать полученную информацию в AutoCAD;

- для окончательной подготовки чертежа матрицы с помощью интерфейса перейти в среду графического пакета AutoCAD, вызвать

из памяти ЭВМ контур профиля с указанными точками для расчета поясков и развертку, проставить размеры (привязку, величины поясков и т. д.) и сделать нужные записи;

- с помощью плоттера или принтера получить твердую копию чертежа матрицы;

- сохранить полученный чертеж, для чего сделать его архивную копию.

Подготовка чертежа форкамеры

Для проектирования форкамеры необходимо провести следующие операции:

- ввести информацию о контуре профиля любым из указанных выше методов и произвести типовые расчеты;

- задать тип проектируемой форкамеры (постоянного поперечного сечения или расширяющейся); указать, имеют ли углы матрицы скругления; для равнотолщинных профилей ввести толщину профиля (для разнотолщинных – толщину элементов профиля); назначить величину подпорного давления, необходимого для стыковой сварки (рекомендуемая величина равна 5), и величину вытяжки из форкамеры в профиль (рекомендуемая величина равна 3);

- для форкамер с расширением задать дополнительно значение вытяжки из контейнера в форкамеру и угол расширения;

- с помощью функциональных клавиш, указанных в меню системы, произвести расчеты и сохранить результаты проектирования для дальнейшей обработки в пакетах AutoCAD и КОМПАС (автоматизированной системе подготовки чертежа инструмента для станков с ЧПУ);

- для окончательной подготовки чертежа матрицы с помощью интерфейса перейти в среду графического пакета AutoCAD, вызвать из памяти ЭВМ контур рассчитанной форкамеры, проставить необходимые размеры и сделать нужные записи;

- с помощью плоттера или принтера получить твердую копию чертежа форкамеры;

- сохранить полученный чертеж, для чего сделать его архивную копию.

Расчет силовых условий при прессовании

Для расчета необходимо выполнение определенных процедур:

- ввод исходной числовой информации в виде групп данных о сплаве, прессуемом профиле, оборудовании и его характеристиках, о

размерах выбранного для прессования слитка и параметрах инструмента (матрицы и форкамеры);

– автоматизированный расчет усилия прессования при заданных величинах механических свойств прессуемого сплава;

– неавтоматизированный расчет усилия, когда сопротивление деформации металла задается технологом с использованием справочных данных либо опытных значений;

– расчет усилия прямого прессования с форкамерами;

– формирование выходных данных расчета в виде таблиц в соответствии с его последовательностью.

Пример проектирования прессового инструмента

Рассмотрим вариант проектирования для уголкового профиля с размерами длинной полки 100×6 мм и короткой 38×9 мм, обозначенного шифром 411331.

Необходимо запустить систему INPRESS, затем войти в раздел «Ввод информации» и ввести последовательно шифр профиля, группу сложности и марку материала (рис. 2.13). Так как профиль 411331 имеет простую форму, то воспользуемся способом покоординатного ввода исходных данных. Для полного описания профиля достаточно ввести прямоугольные координаты X, Y в шести точках, а также радиус закругления R в четвертой точке. Пример ввода координат показан на рис. 2.14.

Шифр профиля => 411331
Группа сложности => 2
Марка материала => Д16

0.0
ВЫХОД Esc
инструкция
СОЗДАНИЕ ЧЕРТЕЖА
ВВОД ИНФОРМАЦИИ
ВЫХОД Esc
<input type="text" value="Покоординатный"/>
Из базы данных
Из AutoCad

Рис. 2.13. Окно ввода информации для профиля 411331

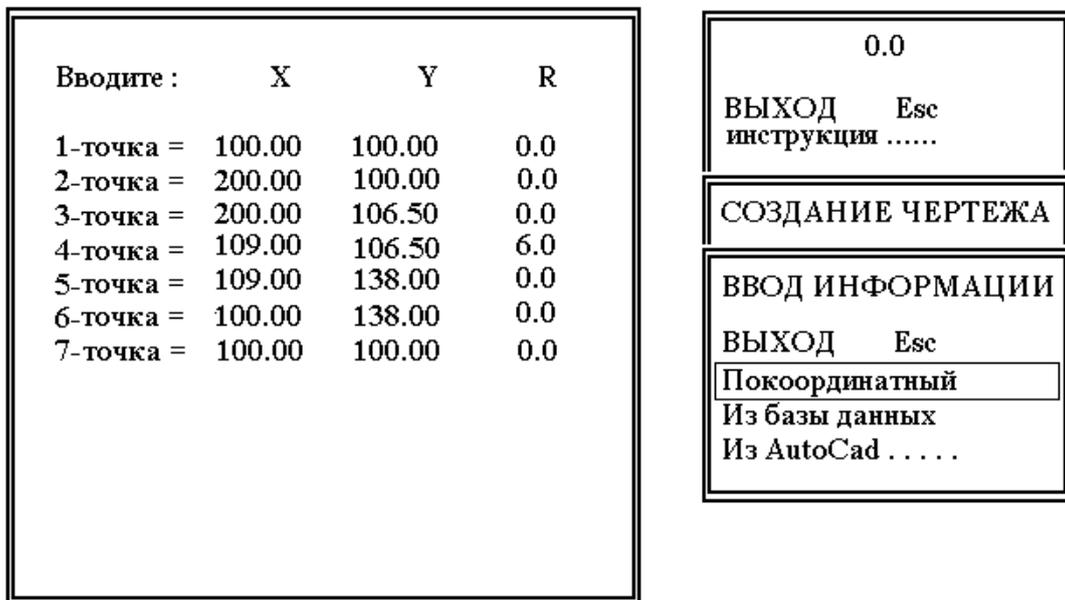


Рис. 2.14. Окно ввода координат точек профиля 411331

Далее нужно выйти в главное меню и войти в раздел меню «Типовые расчеты», где произвести последовательно расчет периметра, площади поперечного сечения, массы погонного метра и диаметра описанной окружности профиля. Вид «окна» и расчетные параметры для профиля 411331 представлены на рис. 2.15.

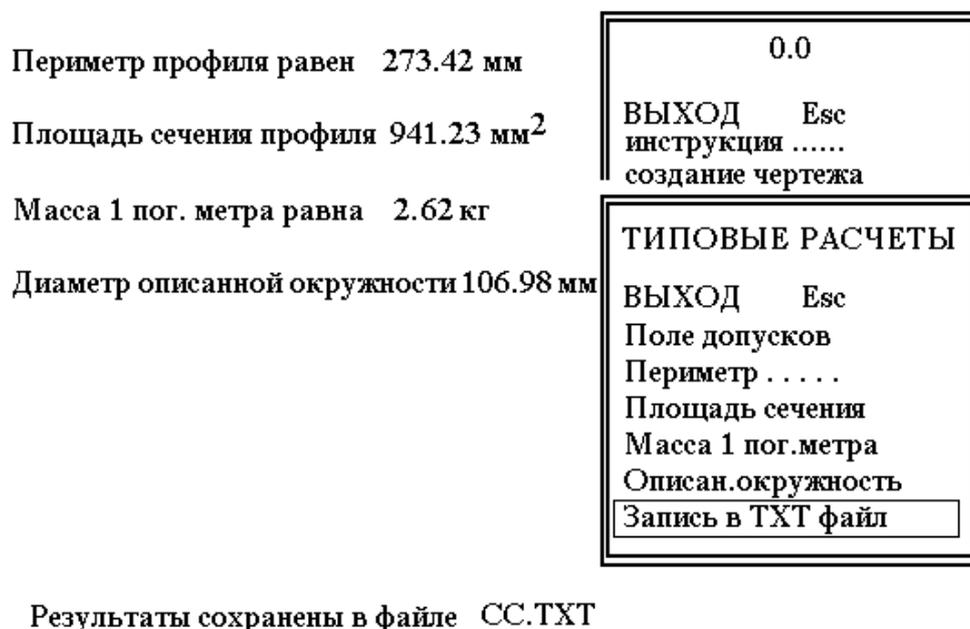


Рис. 2.15. Расчетные параметры профиля 411331

Для передачи полученной информации в графический пакет AutoCAD с целью построения чертежа профиля в соответствии с тре-

бованиями ЕСКД необходимо внести запись в текстовый файл СС.ТХТ (рис. 2.15). Затем с помощью программных средств связи перейти в среду AutoCAD и осуществить следующие процедуры:

- получить контур проектируемого профиля в специально подготовленных рамках формата А3 или А4, для чего считать в интерфейсе полученный ранее файл, если он не был подготовлен в системе AutoCAD;

- скопировать и сохранить с новым именем (например 411311.dwg) полученный контур профиля с целью его дальнейшего использования для проектирования матрицы и хранения в архиве;

- скопировать и сохранить с новым именем (например 411311N.dwg) рабочий файл для подготовки нормали профиля (рис. 2.16);

- в последнем файле, пользуясь средствами и возможностями системы AutoCAD, нанести все необходимые размеры профиля и скорректировать или нанести новые записи;

- для переноса расчетных параметров в графы нормали считать ранее полученный файл СС.ТХТ.

После ввода контура профиля входим в раздел «Конструкторские расчеты» и выполняем пункты данного подменю. Раздел «Размещение на зеркале матрицы» в меню «Конструкторские расчеты» позволяет разместить профиль на зеркале матрицы, расположив его таким образом, чтобы максимально выровнять скорости истечения металла в канале матрицы (рис. 2.17). В случае многоканального прессования необходимо расположить каждый профиль на зеркале матрицы.

При назначении припусков рекомендуется зайти в соответствующий режим меню и назначить припуск 1 % на все размеры профиля. Конструктор имеет возможность назначить и иной (бóльший) припуск, а также сделать его корректировку.

Особенностью расчета рабочих поясков является то, что он будет произведен для каждой точки в том месте, где ее указал конструктор, например как изображено на рис. 2.18, и величина рабочего пояска будет отнесена для всего участка до следующей точки. Во время расчета для каждой точки система станет выводить вписанную окружность (рис. 2.18) и рассчитанный элементарный участок (геометрическая иллюстрация алгоритма). После расчета последней точки она выдаст список расчетных значений пояска для всех точек в относительных величинах (рис. 2.19).

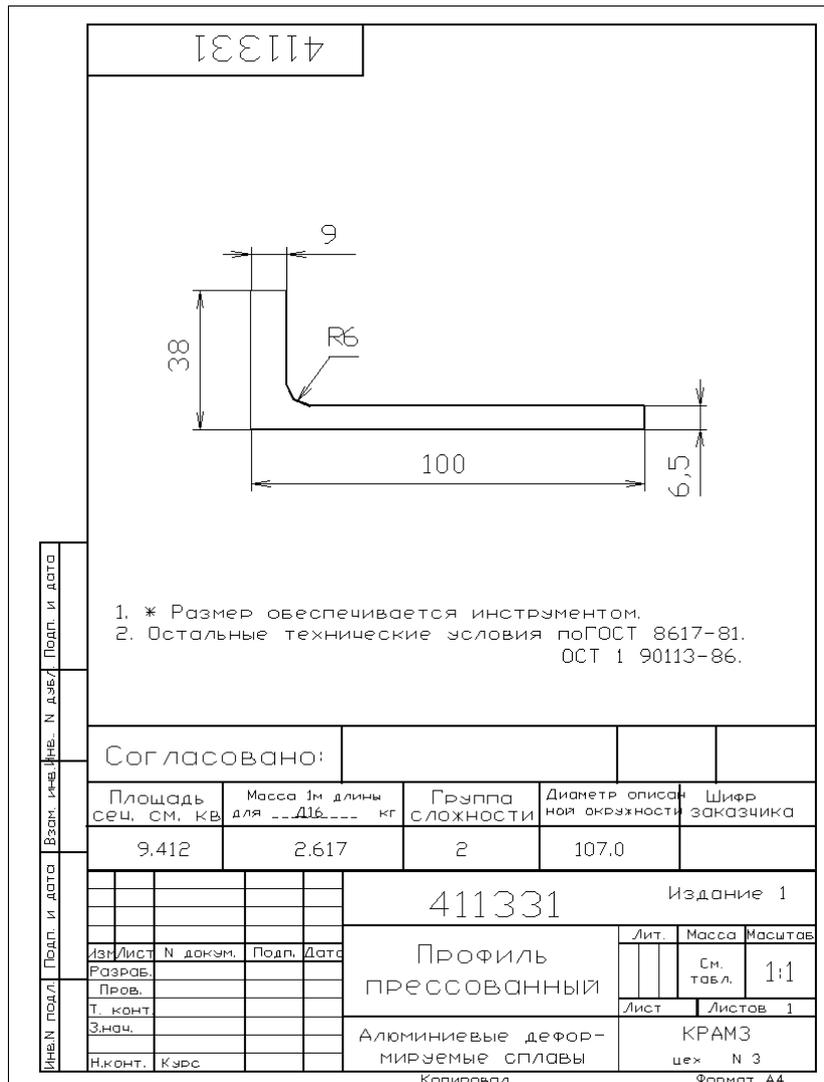


Рис. 2.16. Чертеж нормали профиля 411331

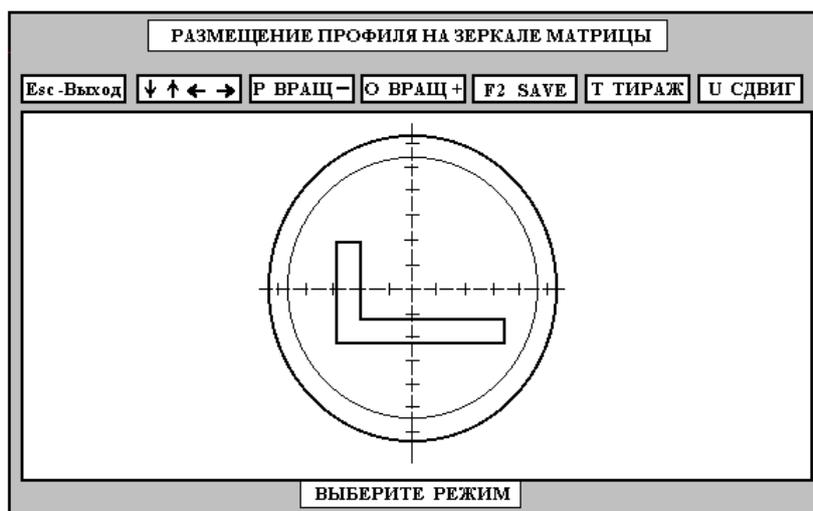


Рис. 2.17. Окно для размещения профиля на матрице

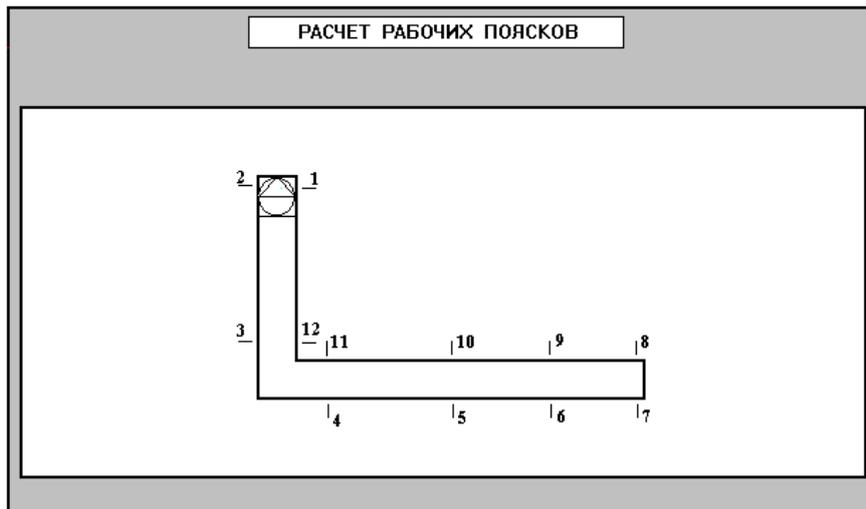


Рис. 2.18. Окно для расчета калибрующих поясков

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПОЯСКОВ

Номер точки	Координаты		Величина пояска
	X	Y	
1	250.82	229.98	5.50
2	241.82	229.98	5.50
3	241.82	205.98	8.50
4	255.82	193.98	5.50
5	286.82	193.98	6.00
6	321.82	193.98	5.00
7	339.82	193.98	3.00
8	339.82	200.48	3.00
9	321.82	200.48	5.00
10	286.82	200.48	6.00
11	255.82	200.48	5.50
12	250.82	206.98	8.50

Центр матрицы = (278.0, 203.0)
 Диаметр = 250.0

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1

Фактическое значение минимального пояска → 3

Рис. 2.19. Окно для показа развертки поясков

Далее с помощью клавиши <F4> можно скорректировать величины поясков. Для вывода развертки калибрующих поясков нажимают клавишу <F5>. Выполнив таким образом все расчеты, конструктор входит в систему AutoCAD, загружает чертеж под именем Matr.dwg и обращается к пункту меню «В матрицу» для передачи рассчитанных данных из системы INPRESS в среду AutoCAD. На экране появится чертеж матрицы с выбранными точками и разверткой калибрующего пояска. Вся дальнейшая работа проектировщика сводится к образмериванию чертежа матрицы и выводу его на печатающее устройство (рис. 2.20).

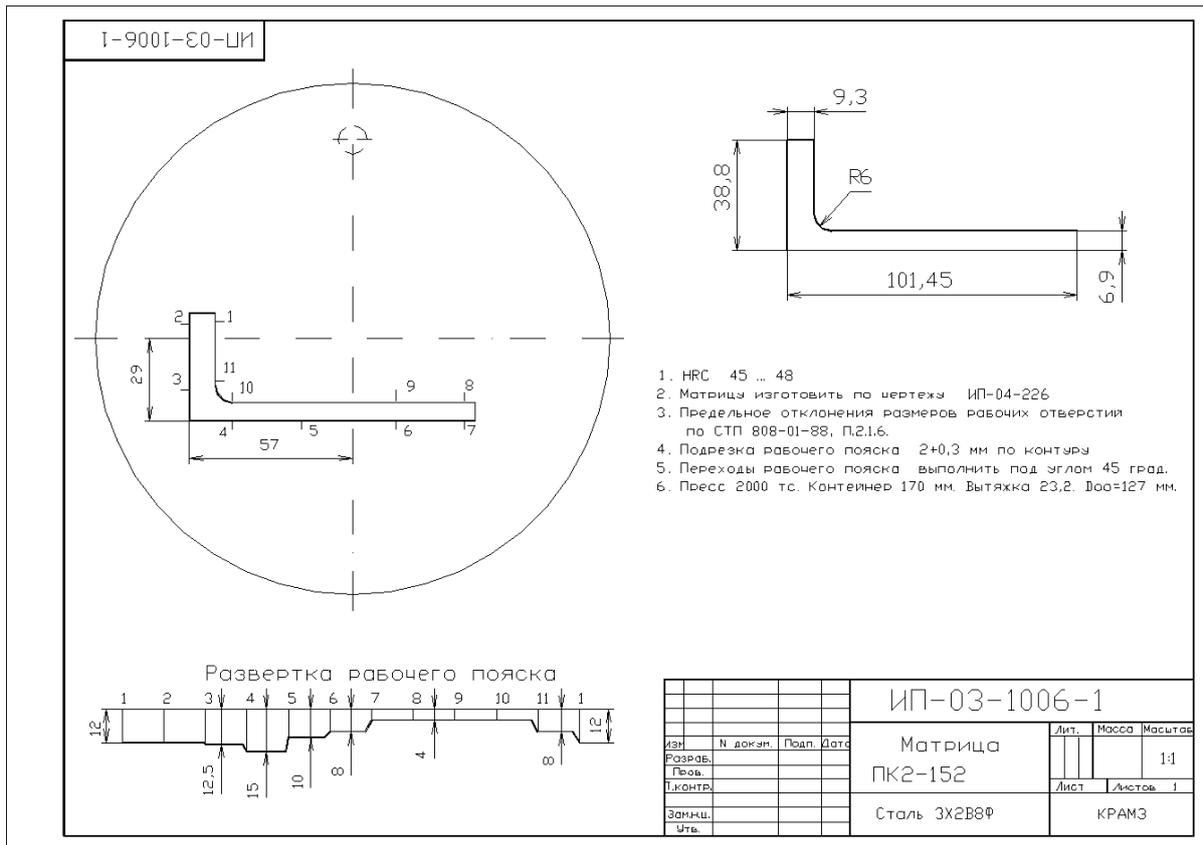


Рис. 2.20. Чертеж матрицы

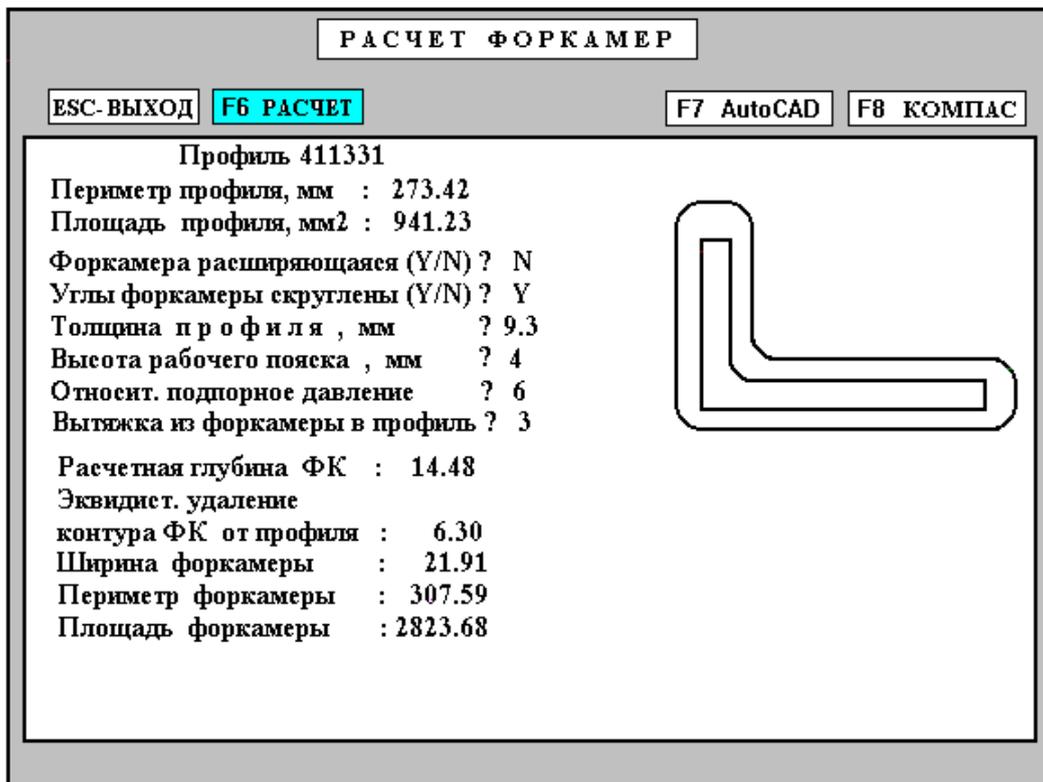


Рис. 2.21. Окно с данными расчета форкамеры

Исходные данные для расчета энергосиловых параметров		
- номер профиля		/n / : 411331
- площадь профиля,	mm ²	/f1/ : 941
- периметр профиля,	mm	/c1/ : 273
- ширина профиля,	mm	/b1/ : 100
- толщина профиля,	mm	/s / : 9
- средняя высота, рабочего пояса,	mm	/h1/ : 8
Процесса:		
- диаметр контейнера		/d0/ : 170
- скорость прессштемпеля, мм/с		/v0/ : 5.5
- длина распрессованного слитка		/l0/ : 500
- температура слитка		/t0/ : 480
- число каналов матрицы		/k9/ : 1
Форкамеры:		
- площадь форкамеры,	mm ²	/f2/ : 2824
- периметр форкамеры,	mm	/c2/ : 307
- глубина форкамеры,	mm	/h2/ : 15
- ширину форкамеры,	mm	/b2/ : 22
- вытяжка		/l2/ : 3

Результаты расчета энергосиловых параметров

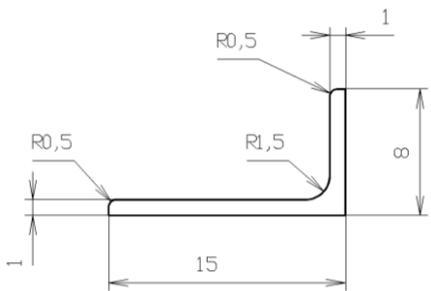
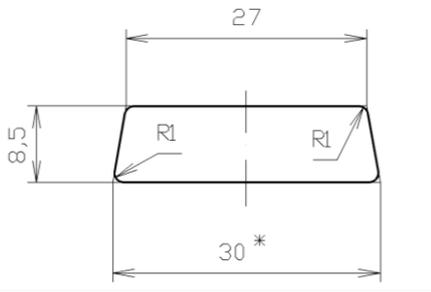
Длительность деформации в контейнере (с), t1 = 8.74702				
Начальное Sдо= 1.33618 кг/мм*мм. Конечное Sдк= 2.24708 кг/мм*мм				
Уточните (для контейнера): Начальное Sдо=1.3				
Конечное Sдк=4				
тогда среднее Sдср= 2.28035				
Sд среднее в форкамере = 4.00000				
Составляющие усилия прессования (ТМ1, RM1, ТК), суммарное усилие (P1) в кг и давление (P1/F) в кг/мм*мм при прессовании ИЗ КОНТЕЙНЕРА В ФОРКАМЕРУ.				
ТМ	RM	ТК	P1	P1/F1
62247.13	143740.78	258033.53	533564.23	23.52
Составляющие усилия (ТМ2+RM2, ТР, ТФк), суммарное усилие (P2) в кг и давление (P2/Fфк) в кг/мм*мм при прессовании ИЗ ФОРКАМЕРЫ В ПРОФИЛЬ.				
ТМ2+RM2	ТР	ТФк	P2	P2/Fфк
191301.20	120093.41	206207.46	517602.06	22.81
Номер профиля (N), Вытяжка по форкамере (L2), Глубина ФК (H2) в мм Относительное давление (P2/S) в кг/мм*мм и усилие (P) в кг				
Номер профиля	Вытяжка по форкамере	Глубина ФК, мм	Отн.давление P/S	Полное усилие, кг
411331	3.00	15.00	5.70	1051166.29

Рис. 2.22. Пример расчета усилия прессования

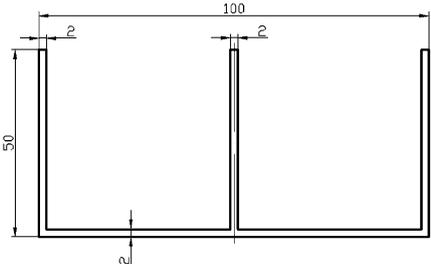
Для проведения расчетов параметров форкамеры конструктор должен предварительно задать координаты профиля одним из возможных способов, описанных в разделе «Ввод информации», и выполнить размещение профиля на зеркале матрицы. После этого ему нужно выбрать функцию «Расчет форкамер» в главном меню системы INPRESS. При этом на экране появится окно, изображенное на рис. 2.21. После выбора функции «F6 – Расчет» ему нужно задать требуемую информацию. Пример проектирования форкамеры для профиля 411331 представлен на рис. 2.21. Технологические расчеты, сопровождающие подсистему INPRESS1, позволяют определить составляющие давления и усилия прессования, а также полное усилие для выбора оборудования. На рис. 2.22 приведен пример расчета энергосиловых параметров для проектируемого профиля 411331.

Контрольные задачи

Провести технологические расчеты, построить чертеж нормали и спроектировать прессовый инструмент (матрицу и форкамеру) для прессования заданного профиля.

Номер задания	Эскиз профиля	Материал изделия	Дополнительное условие
1	2	3	4
1		АД31	Припуск 2 % на габарит
2		АД1	Припуск 1 % на габарит
3		АД31	Припуск 1 % на габарит

4		АД31	Припуск 3 % на габарит
5		АД1	Припуск 3 % на габарит
6		АД31	Припуск 1 % на габарит
7		АД1	Припуск 1 % на габарит
8		АД31	Припуск 1 % на габарит
9.		АД31	Припуск 1 % на габарит

10.		АД1	Припуск 2 % на габарит
-----	---	-----	---------------------------

2.4. САПР технологии совмещенной прокатки-прессования (САПР SPP)

Разработанная САПР может быть использована как подсистема подготовки технологических данных для проектирования инструмента в системе INPRESS, а может быть применена как отдельный модуль для расчета параметров совмещенной прокатки-прессования. Научные и методологические аспекты этого процесса изложены в монографии [10].

Общая структура алгоритма и исходные данные для расчетов

САПР SPP позволяет определить осуществимость (реализуемость) процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП), рассчитать энергосиловые параметры с графической поддержкой процедуры расчетов, а также спроектировать валковый и прессовый инструмент.

Для работы с программой необходимо ввести исходную информацию, в качестве которой используют размеры калибра, заготовки и пресс-изделия, диаметры валков и механические характеристики металла или сплава (рис. 2.23). Для некоторых металлов и сплавов значения предела прочности имеются в базе данных. Расчет ведут по пяти вариантам с целью последующего анализа результатов и выбора оптимальных значений очага деформации. Для такого анализа предусмотрено построение графика зависимости коэффициента k_y от величины удаления матрицы от общей оси валков при различных величинах абсолютного обжатия при прокатке (рис. 2.24).

После выбора оптимального варианта параметров очага деформации, а также деформационных параметров, ведется расчет усилий и моментов в открытых и закрытых ручьях калибра.

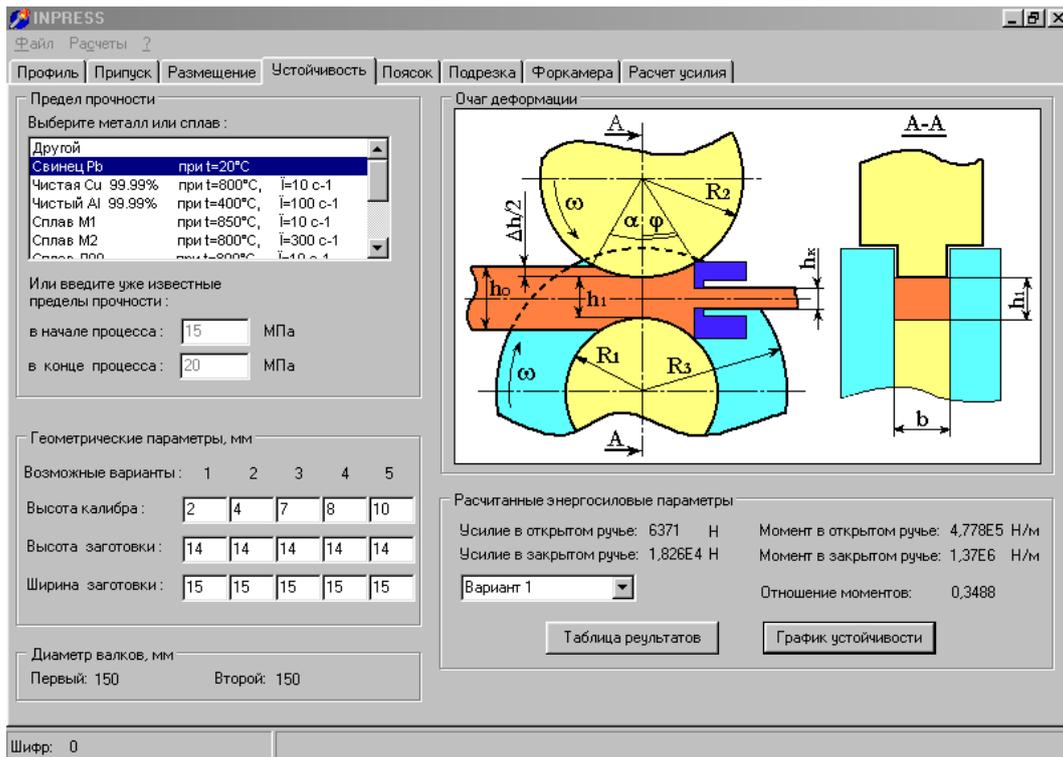


Рис. 2.23. Окно программы по определению реализуемости процесса СПП

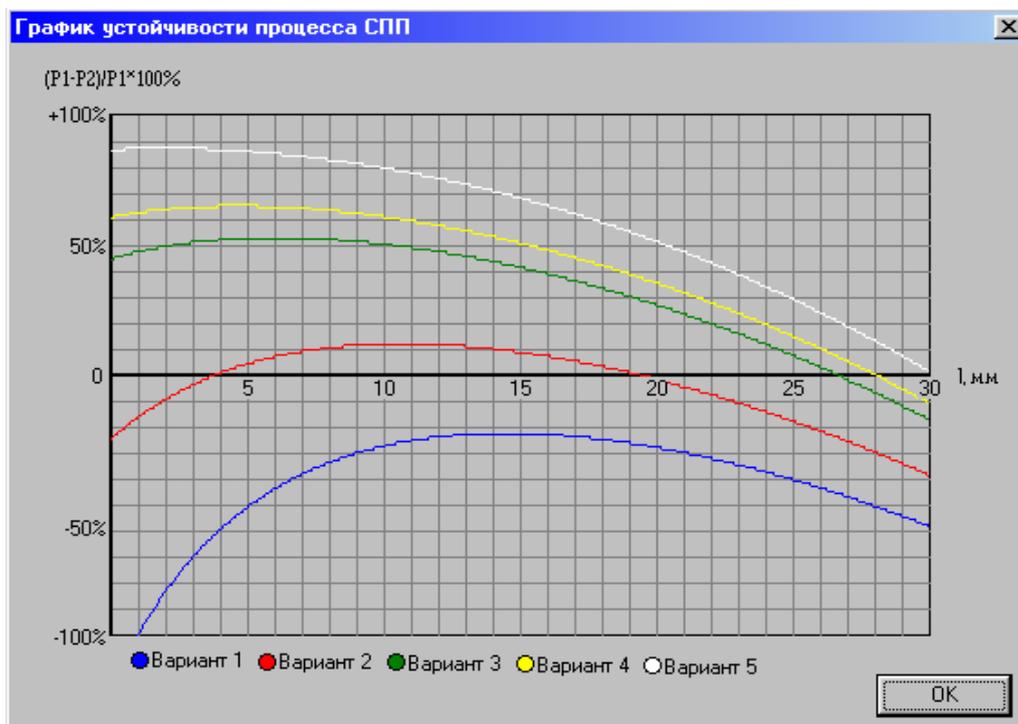


Рис. 2.24. График изменения коэффициента k_y по длине очага деформации

Приведем алгоритм расчета реализуемости процесса.

1. Вводят исходные данные для расчетов и задаются величиной обжатия при прокатке

2. Определяют величину дуги контакта при прокатке L_1 и соответствующую ей величину центрального угла α (см. рис. 2.23) по формулам:

$$L_1 = \sqrt{R^2 \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}, \quad \sin \alpha = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta h}{2R}\right)^2}.$$

3. Рассчитывают величины удаления матрицы от общей оси валков L_2 и соответствующего ей центрального угла φ , характеризующие удаленность зеркала матрицы от плоскости, проходящей через оси вращения валков, определяют по формуле

$$L_2 = R \sin \varphi.$$

4. Находят общую длину зоны контакта металла с валками по выражению

$$L = L_1 + L_2.$$

5. Рассчитывают площадь контакта заготовки с гребнем верхнего валка и с дном ручья нижнего валка на стадии установившегося течения при условии полного заполнения металлом зоны перед матрицей по формуле

$$F_1 = 0,0349 (\alpha + \varphi) R b,$$

а площадь контакта заготовки со стенками калибра – по выражению

$$F_2 = 0,0349 (\alpha + \varphi) R h.$$

6. Находят площадь распрессованной заготовки перед зеркалом матрицы по соотношению

$$F_m = bh \left[\frac{2R}{h(1 - \cos \varphi)} + 1 \right].$$

7. Вычисляют усилие, подводимое валками и достигаемое за счет сил трения, которые возникают на поверхности контакта калибра с заготовкой, по формуле

$$P_1 = \tau (F_1 + F_2) = 0,0349 (\alpha + \varphi) R \psi \sigma_s (b + h),$$

где τ – значение напряжения контактного трения, $\tau = \psi \sigma_s$; $\psi = 0,5 - 0,9$ – показатель трения по Зибею, σ_s – сопротивление металла деформации.

8. Рассчитывают составляющую силы, необходимую для осуществления основной деформации металла при прессовании, по формуле

$$P_2 = 2,577 \sigma_s F_M \ln(\mu) + \sigma_s \mu \pi r_m l_{\text{п}},$$

где μ – коэффициент вытяжки при прессовании, r_m – радиус калибрующего отверстия матрицы, $l_{\text{п}}$ – высота рабочего пояса матрицы.

9. Проверяют условие осуществимости, при котором процесс СПП реализуем:

$$k_y = \frac{P_1 - P_2}{P_1} 100\% \geq 0,$$

а если оно не выполняется, то изменяют параметры обжатия при прокатке и повторяют расчеты.

10. Рассчитывают энергосиловые параметры [10], для чего находят силу, действующую на матрицу по формуле

$$P_{\text{матр}} = \frac{0,12\sigma_s(A-11,5)}{\sqrt{3}} \left[2 \ln \mu (b+1)(L_1 + L_2)h - \frac{b}{(A+1)}(L_1^2 + L_2^2) + \frac{\ln \mu}{2h(A+1)}(L_1^3 + L_2^3) - \frac{bh}{12(2hA+2h)^3}(L_1^4 + L_2^4) + \frac{\ln \mu}{30(2hA+2h)^3}(L_1^5 + L_2^5) \right],$$

и силу, действующую на валки:

$$P_{\text{вал}} = (1,7 - 0,38A)\sigma_s \frac{4bh}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{h}{12h(A+1)} - 1 \right) (L_1 \ln(2h^2(A+1) + L_1^2) + L_2 \ln(2h^2A + 2h^2 + L_2^2)) - (L_1 + L_2) \left(\frac{h}{12h(A+1)} - 1 \right) \ln(2h^2(A+1)) + \frac{3 \ln \mu}{2bh} (L_1^2 + L_2^2) - \frac{(L_1^3 + L_2^3)}{12(2hA+2h)^2} + \frac{2bh}{\sqrt{3}} + \frac{\ln \mu}{bh} \left(\frac{bh\sqrt{2h(A+1)}}{\sqrt{h}} - \sqrt{2h^2(A+1)} \right) (L_1 \arctan \frac{L_1}{\sqrt{2h^2(A+1)}} + L_2 \arctan \frac{L_2}{\sqrt{2h^2(A+1)}}) \right].$$

Пример расчета технологических параметров и определение реализуемости процесса СПП для прессования прутка из сплава свинца с сурьмой диаметром 7 мм из заготовки размерами 14×15 мм для установки с диаметром валков 150 мм приведен на рис. 2.23, а графики устойчивости – на рис. 2.24.

Контрольные задачи

Номер задания	Условия задачи	Сплав	Температура заготовки, °С
1	2	3	4
1	Определить с помощью САПР реализуемость процесса прокатки-прессования заготовки размерами $h_0 \times b_0 \times l_0 = 30 \times 30 \times 2000$ при следующих данных: диаметр прутка 10 мм; диаметр валков 260 мм, размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b = 15 \times 32$ мм, высота рабочего пояска 5 мм, углы $\alpha = \varphi = 15$ градусов	АД1	470
2	Определить реализуемость процесса прокатки-прессования заготовки размерами $h_0 \times b_0 \times l_0 = 20 \times 20 \times 1500$ из сплава при следующих данных: диаметр прутка 10 мм; диаметр валков 400 мм, размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b = 10 \times 22$ мм, высота рабочего пояска 3 мм, углы $\alpha = \varphi = 20$ градусов	АМг6	460
3	Определить реализуемость процесса прокатки-прессования заготовки размерами $h_0 \times b_0 \times l_0 = 20 \times 20 \times 1500$ при следующих данных: диаметр прутка – 15 мм; диаметр валков 200 мм, размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b = 10 \times 22$ мм, высота рабочего пояска 3 мм, углы $\alpha = \varphi = 30$ градусов	М0	900
4	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу, подводимую с помощью валков P_1 при прокатке-прессовании заготовки размерами $h_0 \times b_0 \times l_0 = 30 \times 30 \times 2000$ мм, если диаметр валков равен 260 мм, размеры калибра в наименьшем сечении составляют $h \times b = 15 \times 32$ мм, а углы $\alpha = \varphi = 15$ градусов	АД31	480
5	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу P_2 при прокатке-прессовании, затрачиваемую на выдавливание прутка диаметром 9 мм, если диаметр валков равен 260 мм, размеры калибра в наименьшем сечении составляют $h \times b = 15 \times 32$ мм, высота рабочего пояска 5 мм, а углы $\alpha = \varphi = 15$ градусов	Pb+2 %Sb	20

6	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу, действующую на матрицу $P_{\text{матр}}$ при прокатке-прессовании заготовки размерами $30 \times 30 \times 2000$, для следующих данных: диаметр прутка 10 мм; диаметр валков 260 мм, размеры калибра в наименьшем сечении 15×32 мм	AK12	550
7	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу, действующую на матрицу $P_{\text{матр}}$ при прокатке-прессовании заготовки размерами $20 \times 20 \times 1500$, при следующих данных: диаметр прутка 10 мм; диаметр валков 400 мм, размеры калибра в наименьшем сечении 10×22 мм	AK5	500
8	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу, действующую на матрицу $P_{\text{матр}}$ при прокатке-прессовании заготовки размерами $20 \times 20 \times 1500$ при следующих данных: диаметр прутка 15 мм; диаметр валков 200 мм, размеры калибра в наименьшем сечении 10×22 мм	M1	950
9	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу, действующую на валки $P_{\text{вал}}$ при прокатке-прессовании заготовки размерами $30 \times 30 \times 2000$, для следующих данных: диаметр прутка 10 мм; диаметр валков 260 мм, размеры калибра в наименьшем сечении 15×32 мм	A5	400
10	Определить реализуемость процесса и рассчитать силу, действующую на валки $P_{\text{вал}}$ при прокатке-прессовании заготовки размерами $20 \times 20 \times 1500$ из сплава, при следующих данных: диаметр прутка 10 мм; диаметр валков 400 мм, размеры калибра в наименьшем сечении 10×22 мм	АД31	520

Глава 3

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОВКИ И ШТАМПОВКИ

3.1. САПР ковки поковок типа «вал» (САПР VAL)

Общее описание САПР VAL

Система автоматизированного проектирования VAL позволяет провести технологические расчеты процесса ковки поковок типа «вал» и сформировать необходимую технологическую документацию (технологическую карту, чертежи детали, поковки, эскизы переходов протяжки) [1]. Структурная схема программы представлена на рис. 3.1.

В качестве программной среды выбран язык программирования Visual Basic for Application, интегрированный с системой SolidWorks 2003. САПР VAL имеет простой и удобный интерфейс. Переходы между окнами программы осуществляются с помощью кнопок «Далее» и «Назад». При нажатии кнопки «Далее» производится расчет или назначение, необходимое для работы программы.

Ввод исходных данных и выбор оборудования

Блок ввода данных представлен двумя окнами. В первом окне вводится шифр поковки с дальнейшим сохранением в базе данных, фамилия, имя, отчество технолога. При совпадении шифра поковки с ранее спроектированной система сообщает об этом технологу и предлагает редактировать существующий проект или ввести новый шифр поковки. В базе данных сохраняются все спроектированные проекты. И при нажатии кнопки «открыть» можно выбрать из базы данных для просмотра или редактирования ранее сохраненный проект. Во втором окне выбирают числа ступеней вала и ввод геометрических параметров детали (рис. 3.2).

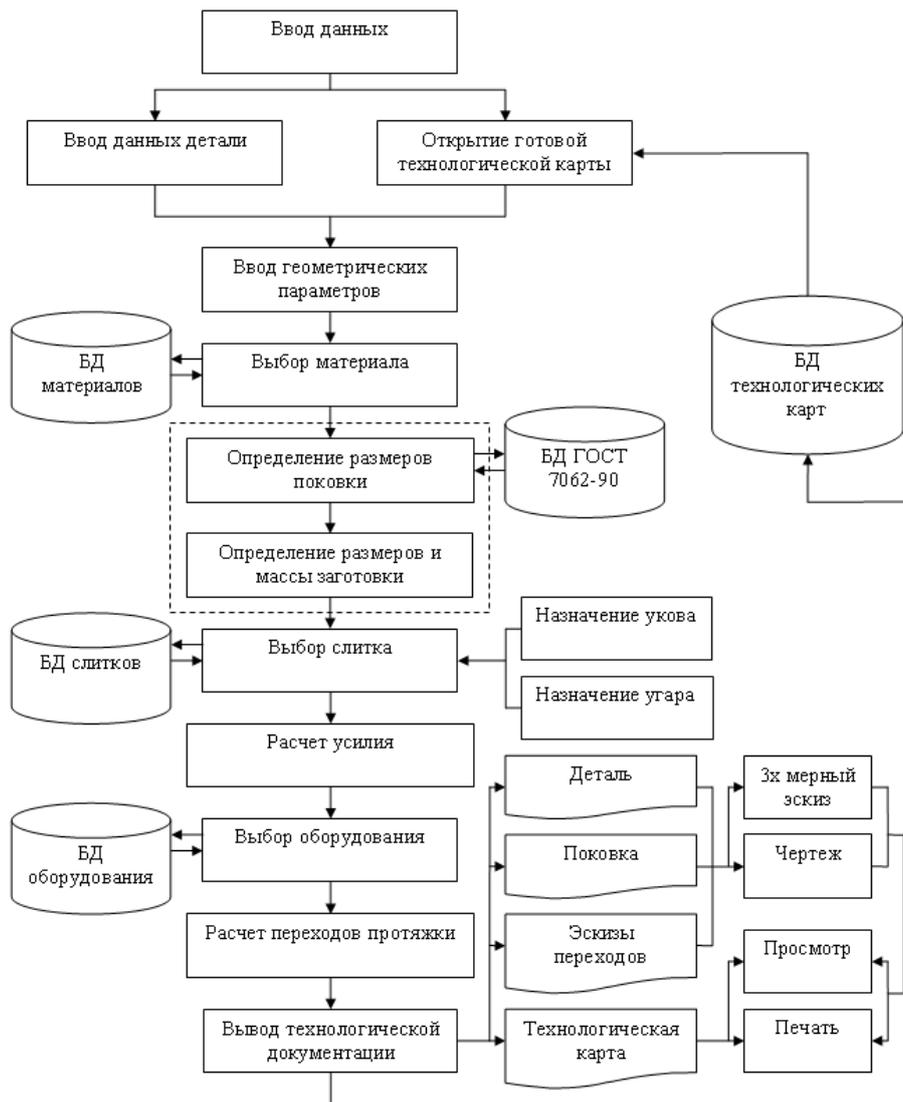


Рис. 3.1. Структурная схема программы VAL

Геометрические параметры:		Диаметр ступени	Длина ступени
D1	350	L1	950
D2	375	L2	100
D3	766	L3	840
D4	375	L4	100
D5	350	L5	280
D6	105	L6	315
D7	90	L7	70
D8	600	L8	200

Рис. 3.2. Окно ввода геометрических параметров

При переходе к следующему окну осуществляется назначение напусков, допусков, припусков и расчет буртов и фланцев по методике в соответствии с ГОСТ 7062–90.

В окне выбора материала из базы данных назначается марка стали (рис. 3.3). В базе данных по материалам представлены углеродистые и легированные стали, которые удовлетворяют ГОСТ 7062–90. В системе реализована возможность пополнения и редактирования базы данных (кнопка «редактировать»).

Рис. 3.3. Окно выбора материала

При нажатии кнопки «Далее» и переходе к следующему окну система производит расчет усилия, необходимого для обжима при протяжке по формуле [8]

$$P = \gamma \cdot \psi (1 + 0,17 \cdot l/d) \cdot \sigma_T \cdot d \cdot l,$$

где γ – коэффициент, зависящий от формы бойков (вырезные $\gamma = 1,25$); ψ – масштабный коэффициент, l – величина подачи, d – диаметр заготовки, σ_T – предел текучести.

Процедура выбора слитка для протяжки реализована в виде окна параметров рассчитанной поковки и окна расчета необходимой заготовки. В окне поковки показаны масса поковки и наибольший диаметр. В другом окне происходит пересчет массы и размеров заготовки с учетом величины угара и укова. После этого из базы данных можно выбрать слиток, удовлетворяющий по массе и размерам (рис. 3.4) рас-

считанному варианту. В окне выбора оборудования показана возможность выбора ковочного пресса по рассчитанному ранее усилию протяжки (рис. 3.5). При этом имеется возможность редактирования базы данных в том случае, если данного вида оборудования там нет.

Рис. 3.4. Окно выбора слитка

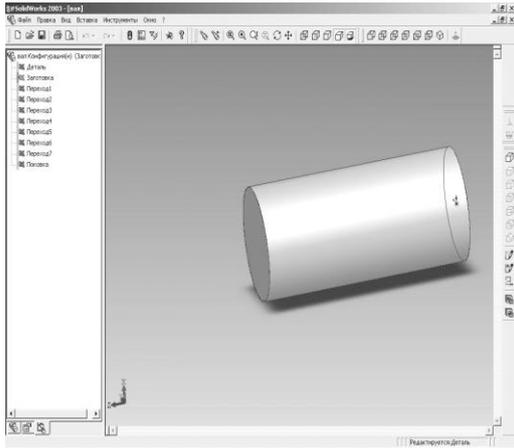
Рис. 3.5. Окно выбора оборудования

Подготовка технологической документации и рабочих чертежей

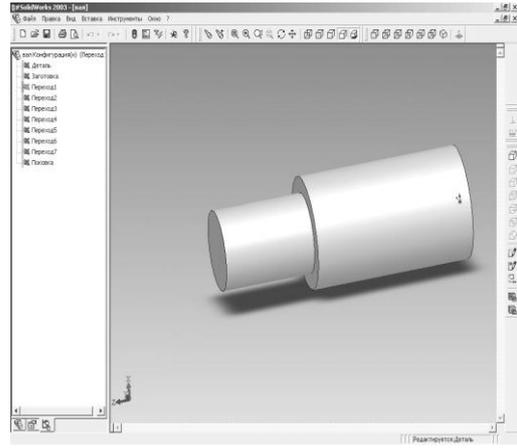
В САПР VAL технологическая документация представлена чертежом детали и поковки и технологической картой. Чертежи генерируются с помощью системы трехмерного твердотельного проектирования SolidWorks. В данном пакете, используя таблицу параметров, можно автоматически построить трехмерный эскиз детали (рис. 3.6) и на его основе сформировать чертеж (рис. 3.7). После нанесения размеров и, при необходимости, корректировки штампа основной надписи чертеж можно отправить на печать.

После назначения напусков, допусков, припусков, расчета буртов и фланцев в таблицу параметров SolidWorks система заносит все необходимые данные для построения трехмерного эскиза поковки (рис. 3.8). После чего по аналогии с эскизом детали формируется чертеж поковки (рис. 3.9). Чертеж и трехмерный эскиз поковки и детали можно вывести на дисплей при помощи окна вывода технологической документации (рис. 3.10).

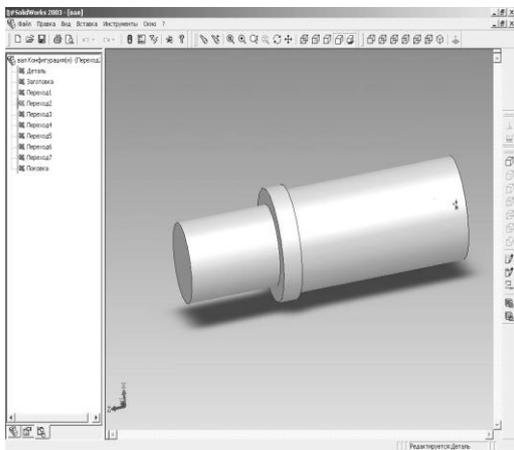
На данном этапе проектирования помимо выполнения чертежей формируются эскизы переходов протяжки (рис. 3.11) и технологическая карта (рис. 3.12), с возможностью редактирования и последующей печати.



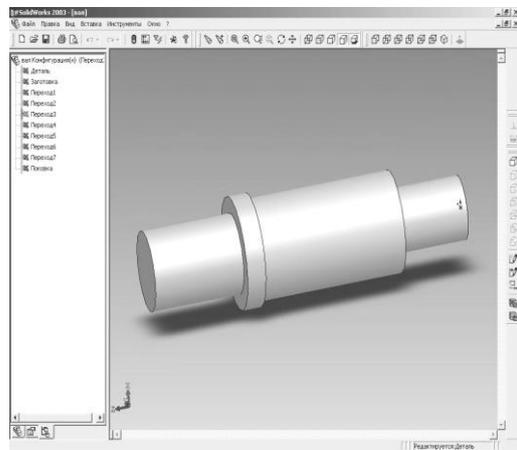
а



б



в



г

Рис. 3.11. Эскизы переходов протяжки вала:
а – первый, *б* – второй, *в* – третий, *г* – четвертый переходы

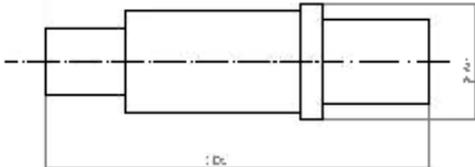
ГУЦМиЗ Технологический институт	НОРМАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА (ковка и объемная штамповка) №		Шифр ковки		Наименование ковки			Вал			
			12345					Баланс металл	Всего на 1 дет. кг.	Вес на 100 шт. кг.	% к весу
	Масса (вес), кг		Марка металла и заменители		Размер заготовки	ГОСТ на марку	Баланс металл	Всего на 1 дет. кг.	Вес на 100 шт. кг.	% к весу	
	ковка	загото	сталь 35ХМ		Ø1265x1665	ГОСТ 4543-11					
	12893	23300					Поковка(100шт)	23300	2330000	58,5	
	Металлопрокат		Количество деталей из 1 ковки			1	Концы некрайности	8854	885400	38	
	Длина по ГОСТу (от-до)	Длина расчетная Гр	Количество деталей из ковок и ковка из 1 заготовки			1					
	Слиток его размеры и вес		Выход годного и коэффициент использования металла				Угар	815,5	81550	3,5	
1300x1700		Выход годного, вес		Вес детали/ норма расхода		Образцы на наладку					
		0,55		0,44							
Наименование операций и переходов	Оборудование		Наименование инструмента и приспособлений	Тепловой режим		Норма времени на 1 шт. в мин.	Рабочая сила				Примечания
	наименование	тоннаж, МН		Температура нагрева и охлаждения	Время нагрева		Профессия	Разряд	Часовая ставка	К-во	
Нагрев заготовки	камерная печь			1280	70	термист	6				
Протянуть d1014x2189	пресс	63	бойки			кузнец	6				
Пресечка	пресс	63	перезимки			пом. кузнеца	6				
Протянуть d724x965	пресс	63	бойки			кузнец	6				
Пресечка	пресс	63	перезимки			пом. кузнеца	6				
Протянуть d917x1831	пресс	63	бойки			кузнец	6				
Пресечка	пресс	63	перезимки			пом. кузнеца	6				
Протянуть d578x730	пресс	63	бойки			кузнец	6				
обрезка по длине ковки	пресс	63	бойки			кузнец	6				
термообработка	камерная печь					термист	6				
ОТК											

Рис. 3.12. Технологическая карта

Контрольные задачи

Спроектировать технологический процессковки, подготовить чертежи и создать твердотельные модели деталей и поковок типа «вал».

Номер задания	Условия задачи	Материал изделия
1	2	3
1	Количество ступеней: 3. $D_1 = 300 \text{ мм}, L_1 = 300 \text{ мм},$ $D_2 = 400 \text{ мм}, L_2 = 300 \text{ мм},$ $D_3 = 500 \text{ мм}, L_3 = 600 \text{ мм}.$	Сталь 25
2	Количество ступеней: 6. $D_1 = 300 \text{ мм}, L_1 = 300 \text{ мм},$ $D_2 = 600 \text{ мм}, L_2 = 300 \text{ мм},$ $D_3 = 300 \text{ мм}, L_3 = 500 \text{ мм},$ $D_4 = 600 \text{ мм}, L_4 = 300 \text{ мм},$ $D_5 = 400 \text{ мм}, L_5 = 200 \text{ мм},$ $D_6 = 300 \text{ мм}, L_6 = 200 \text{ мм}.$	Сталь 30
3	Количество ступеней: 3. $D_1 = 550 \text{ мм}, L_1 = 650 \text{ мм},$ $D_2 = 200 \text{ мм}, L_2 = 800 \text{ мм},$ $D_3 = 650 \text{ мм}, L_3 = 850 \text{ мм}.$	Сталь 35
4	Количество ступеней 4. $D_1 = 400 \text{ мм}, L_1 = 700 \text{ мм},$ $D_2 = 750 \text{ мм}, L_2 = 400 \text{ мм},$ $D_3 = 400 \text{ мм}, L_3 = 650 \text{ мм},$ $D_4 = 300 \text{ мм}, L_4 = 700 \text{ мм}.$	Сталь 40
5	Количество ступеней 4. $D_1 = 300 \text{ мм}, L_1 = 400 \text{ мм},$ $D_2 = 500 \text{ мм}, L_2 = 200 \text{ мм},$ $D_3 = 400 \text{ мм}, L_3 = 500 \text{ мм},$ $D_4 = 300 \text{ мм}, L_4 = 300 \text{ мм}.$	20ХН
6	Количество ступеней 3. $D_1 = 400 \text{ мм}, L_1 = 700 \text{ мм},$ $D_2 = 750 \text{ мм}, L_2 = 400 \text{ мм},$ $D_3 = 500 \text{ мм}, L_3 = 600 \text{ мм}.$	15Х
7	Количество ступеней 5. $D_1 = 300 \text{ мм}, L_1 = 300 \text{ мм},$ $D_2 = 700 \text{ мм}, L_2 = 200 \text{ мм},$ $D_3 = 300 \text{ мм}, L_3 = 500 \text{ мм},$ $D_4 = 750 \text{ мм}, L_4 = 400 \text{ мм},$ $D_5 = 300 \text{ мм}, L_5 = 300 \text{ мм}.$	14ХГС
8	Количество ступеней 4. $D_1 = 350 \text{ мм}, L_1 = 400 \text{ мм},$ $D_2 = 500 \text{ мм}, L_2 = 250 \text{ мм},$	Сталь 40Х

	$D_3 = 300 \text{ мм}, L_3 = 500 \text{ мм},$ $D_4 = 750 \text{ мм}, L_4 = 400 \text{ мм}.$	
9	Количество ступеней 4. $D_1 = 400 \text{ мм}, L_1 = 700 \text{ мм},$ $D_2 = 750 \text{ мм}, L_2 = 400 \text{ мм},$ $D_3 = 400 \text{ мм}, L_3 = 650 \text{ мм},$ $D_4 = 300 \text{ мм}, L_4 = 700 \text{ мм}.$	Сталь 45
10	Количество ступеней 4. $D_1 = 300 \text{ мм}, L_1 = 400 \text{ мм},$ $D_2 = 500 \text{ мм}, L_2 = 200 \text{ мм},$ $D_3 = 400 \text{ мм}, L_3 = 500 \text{ мм},$ $D_4 = 300 \text{ мм}, L_4 = 300 \text{ мм}.$	40ХН

3.2. САПР объемной штамповки (САПР РYСНАГ)

Система автоматизированного проектирования технологии объемной горячей штамповки поковок типа «рычаг» [1] представляет собой подсистему, осуществляющую проектирование технологического процесса, реализованную в пакете SolidWorks.

Общее описание САПР РYСНАГ

При проектировании технологического процесса горячей объемной штамповки система выполняет следующие операции: ввод данных; построение трехмерного эскиза детали; составление чертежа детали; выбор поверхности разреза; назначение припусков, допусков и напусков; определение штамповочных уклонов; определение радиусов закруглений; конструирование пленки под прошивку; построение трехмерного эскиза поковки; составление чертежа поковки; построение расчетной заготовки; составление технологической карты.

Назначение припусков, допусков, напусков, определение штамповочных уклонов и радиусов закруглений при составлении чертежа поковки и построении трехмерного эскиза производится в соответствии с ГОСТ 7505–89, который распространяется на стальные штампованные поковки массой не более 250 кг и с линейными габаритными размерами не более 2 500 мм, изготовленные горячей объемной штамповкой.

На рис. 3.13 приведена структурная схема САПР технологического процесса объемной штамповки, дающая общее представление о данном программном обеспечении.



Рис. 3.13. Структурная схема САПР RYCHAG

Ввод исходных данных и выбор оборудования

Исходной информацией являются геометрические размеры детали, а также марка стали и чистота обработки поверхностей. Пользователь производит ввод исходных данных детали, открыв «Таблицу параметров» (рис. 3.14) в дереве конструирования пакета SolidWorks. На основании введенных геометрических параметров формируется чертеж детали, который можно отредактировать и вывести на печать, выбрав в «Таблице параметров» лист «Чертеж детали».

Размеры	L, мм	A, мм	H, мм	B, мм	D, мм	d, мм	H1, мм	B1, мм	D1, мм	d1, мм
Деталь	245	100	35	23	50	28	50	34	60	40
Поковка			41,2	23	50	19,4	56,6	34	60	31
Основные припуски на размеры, мм			2,5			2,3	2,7			2,5
Дополнительные припуски, учитывающие:										
смещение поковки по поверхности разъема штампа, мм						1,2				1,2
отклонение от прямолинейности, мм			0,6				0,6			
Отклонение межцентрового расстояния, мм						0,8				0,8
Масса детали, кг	3,3									
Масса поковки, кг	4,29									
Вводимые данные										
Расчетные данные										

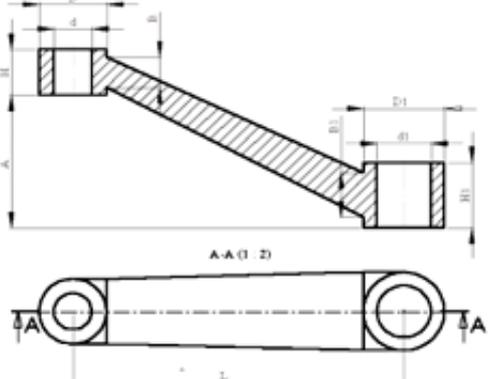


Рис. 3.14. Ввод исходных данных

Закрыв «Таблицу параметров» и выбрав в дереве конструирования конфигурацию «Деталь», пользователю предоставляется возможность просмотреть трехмерный эскиз детали (рис. 3.15), а затем оформить ее чертеж (рис. 3.16).

Формирование чертежа поковки и расчет размеров заготовки

Исходный индекс для последующего назначения основных припусков, допусков и допускаемых отклонений определяется из базы данных в зависимости от массы, марки стали, степени сложности и класса точности поковки.

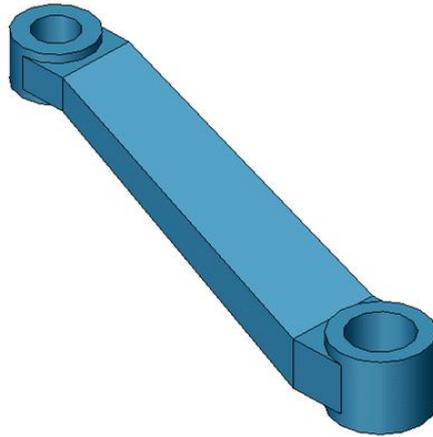


Рис. 3.15. Трехмерный эскиз детали

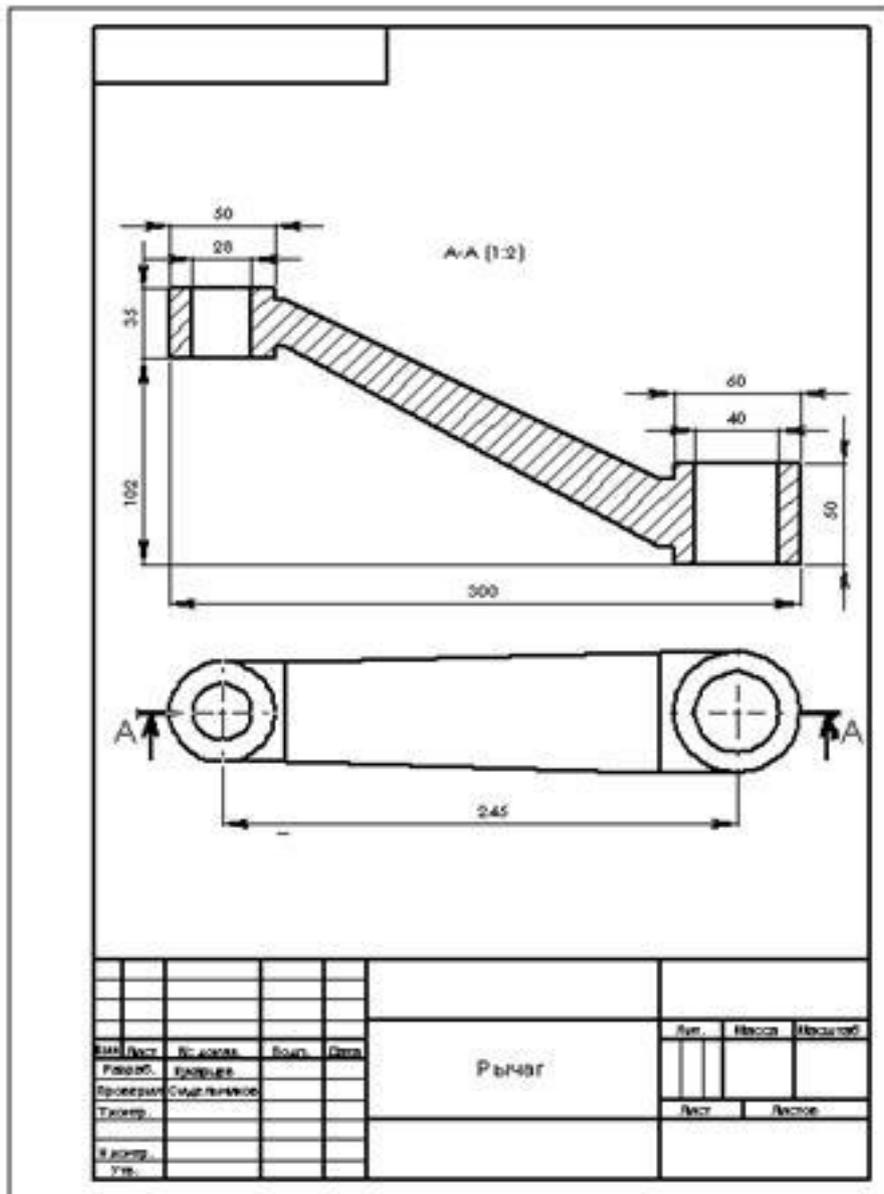


Рис. 3.16. Чертеж детали

Поковки типа «рычаг», штампуемые на КГШП в открытых штампах, относятся к четвертой степени сложности и четвертому классу точности. Припуск на механическую обработку включает основной, а также дополнительные припуски, учитывающие отклонение от формы. Основные припуски в зависимости от исходного индекса, линейных размеров и шероховатости поверхности детали назначаются в соответствии с ГОСТ 7505–89 из базы данных «Основные припуски». Аналогично из базы данных назначаются дополнительные припуски.

Назначение допусков и допускаемых отклонений на линейные размеры производится аналогично назначению припусков, значения допусков определяют по ГОСТ 7505–89 из базы данных «Допуски и допускаемые отклонения». Наружные штамповочные уклоны приняты -5° , внутренние -7° .

Основываясь на ГОСТ 7505–89, создана база данных «Определение радиусов закруглений», в соответствии с которой происходит назначение наружных радиусов закруглений в зависимости от массы поковки.

Внутренние радиусы закруглений больше наружных и назначаются с помощью функции SolidWorks «Уравнение», которая вычисляет внутренний радиус по формуле $R_{\text{вн}} = 3R_{\text{нар}}$.

Пленку под прошивку (рис. 3.17) рассчитывают по формуле [8]

$$s = 0,45\sqrt{d_2 - 0,25h_p - 5} + 0,6\sqrt{h_p},$$

где s – толщина пленки, мм; d_2 – внутренний диаметр, мм; h_p – глубина ручья, мм.

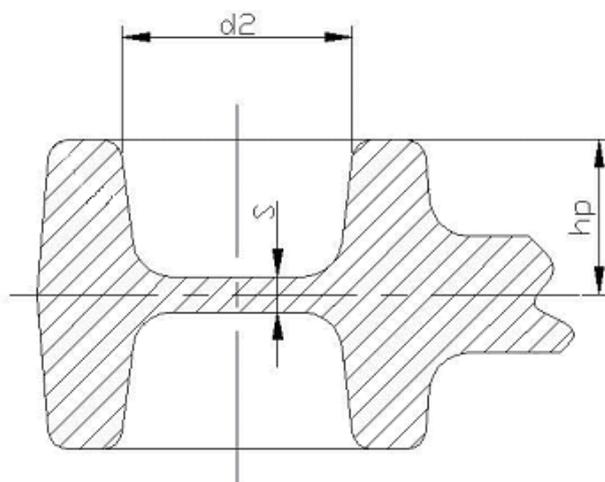


Рис. 3.17. Пленка под прошивку

После назначения припусков, допусков, напусков, определения штамповочных уклонов, радиусов закруглений и конструирования пленки под прошивку формируется трехмерный эскиз поковки (рис. 3.18), который можно просмотреть и вывести на печать, выбрав в дереве конструирования конфигурацию «Поковка».

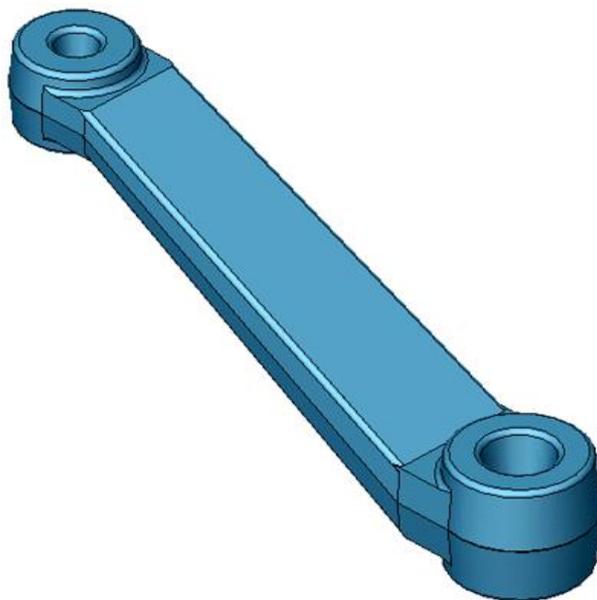


Рис. 3.18. Трехмерный эскиз поковки

Основанием для составления чертежа поковки (рис. 3.19) служит трехмерный эскиз поковки. Просмотреть чертеж можно, выбрав лист «Чертеж поковки» в «Таблице параметров».

Построение расчетной заготовки производится по следующей методике [8]: расчетной называют условную (воображаемую) заготовку с круглыми поперечными сечениями, площади которых равны суммарной площади соответствующих сечений поковки и заусенца.

Отсюда:

$$S_{\text{заг}} = S_{\text{пок}} + 2S_3 = S + 2\xi S_{\text{зк}},$$

где $S_{\text{заг}}$ – площадь поперечного сечения расчетной заготовки в произвольном месте; $S_{\text{пок}}$ – площадь поперечного сечения поковки в произвольном месте; S_3 – площадь сечения заусенца; $S_{\text{зк}}$ – площадь сечения канавки для заусенца, определяемая по нормальям для канавок типа I или расчетом для канавок других типов; ξ – коэффициент заполнения канавки.

Внутренний заусенец (пленку под прошивку) полностью относят к поковке, т. е. включают в величину $S_{\text{пок}}$.

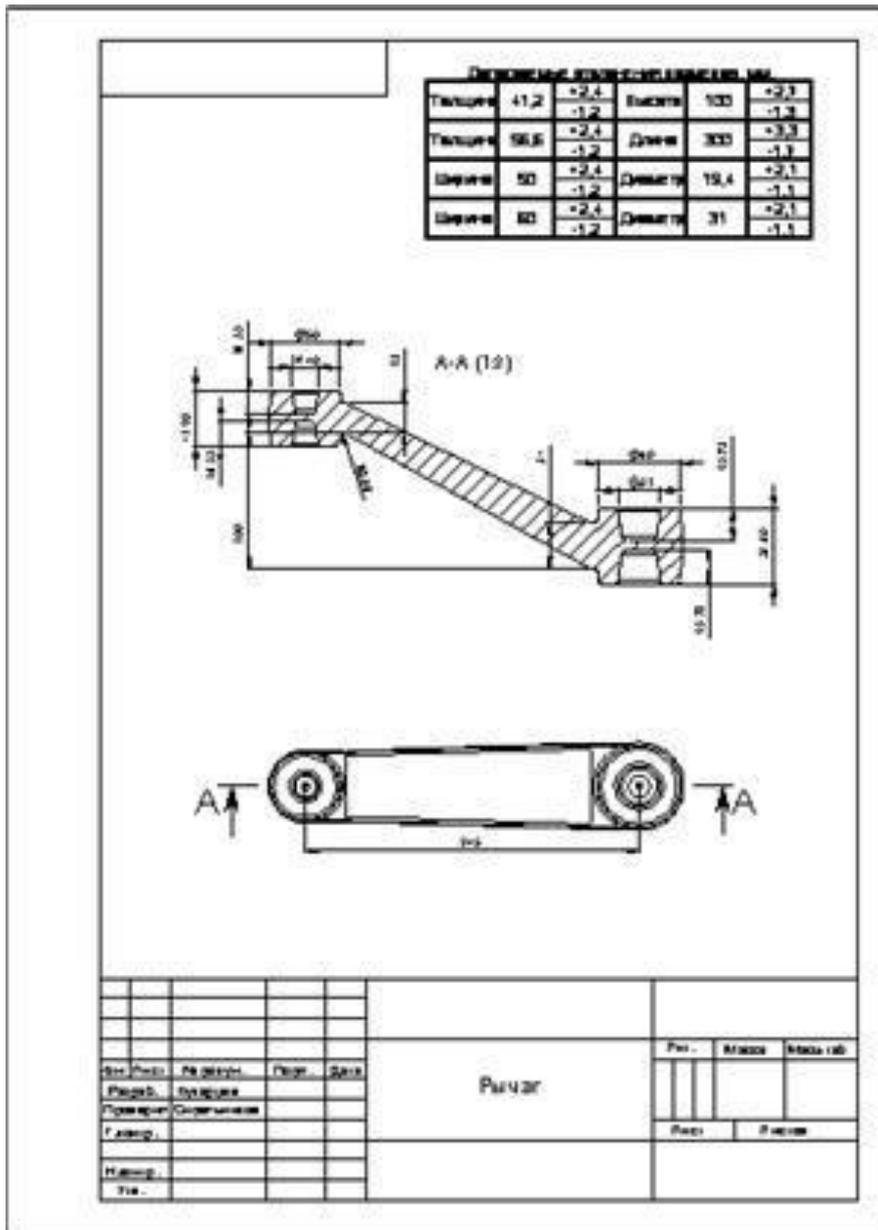


Рис. 3.19. Чертеж поковки

Диаметр расчетной заготовки в произвольном месте находят из равенства

$$\frac{\pi d_{\text{заг}}^2}{4} = S_{\text{заг}}; d_{\text{заг}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{заг}}}{\pi}}$$

Рассчитав значения $d_{\text{заг}}$ для характерных поперечных сечений поковки, отложив отрезки полученных диаметров на линиях этих сечений симметрично по отношению к оси и соединив отрезками прямых и плавными кривыми концевые точки, получим чертеж расчетной заготовки или эпюру приведенных диаметров (рис. 3.20). Расчет-

ную заготовку рекомендуется строить в натуральную величину, т. е. в масштабе 1:1.

Если в масштабе M отложить по ординатам характерные сечения S_3 в виде отрезков $h_3 = S_3/M$, то, соединив концы этих отрезков, получим эпюру сечений расчетной заготовки (рис. 3.20).

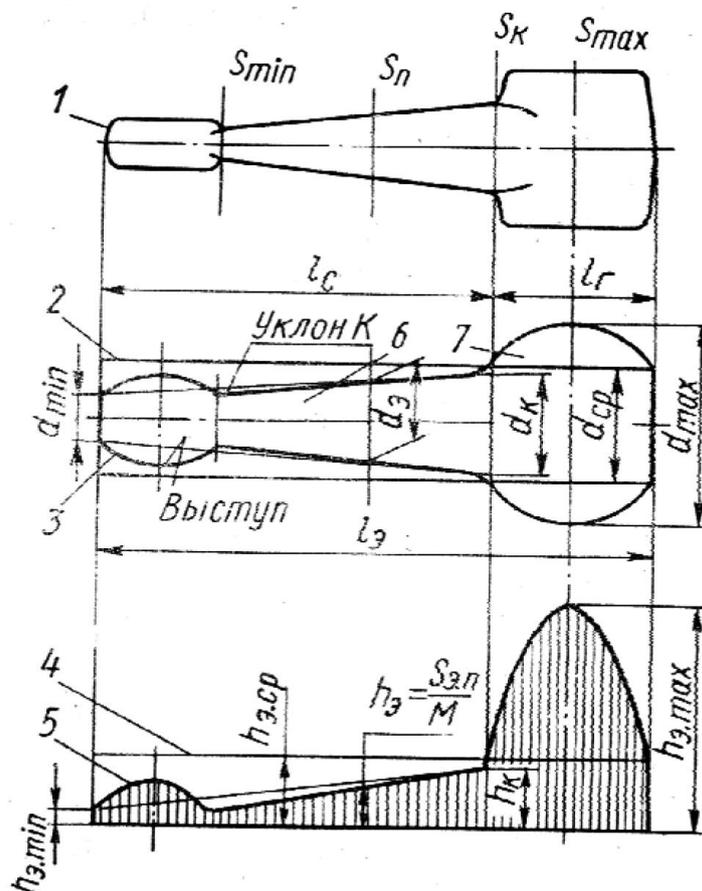


Рис. 3.20. Элементарная расчетная заготовка и ее эпюра сечений (по А. В. Ребельскому): 1 – поковка; 2 – средняя расчетная заготовка; 3 – стержень; 4 – головка; 5 – расчетная заготовка; 6 – выступ; 7 – эпюра среднего сечения; k – конусность

Следовательно, эпюрой сечений называют такую диаграмму, каждая ордината которой в определенном масштабе M представляет собой соответствующую площадь поперечного сечения расчетной заготовки. При умножении площадей отдельных ее элементов на принятый масштаб M получим объем соответствующего элемента расчетной заготовки:

$$V_x = F_{3x} M,$$

где V_x – объем любого x -го элемента расчетной заготовки; F_{3x} – площадь соответствующего элемента эпюры сечений.

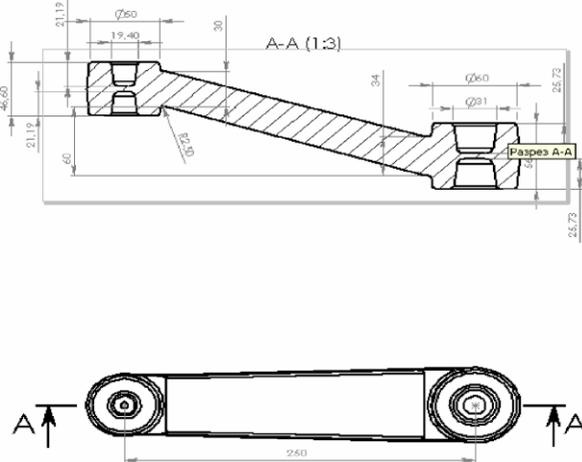
ИЦМиЗ СФУ Технологический факультет Кафедра "Обработки металлов давлением"		НОРМАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА (ковка и объемная штамповка) № ____		Шифр поковки		Наименование поковки		Рычаг					
ЭСКИЗ (с указанием габаритных размеров) 				Масса(вес), кг		Марка металла и заменители	Размер заготовки	ГОСТ на марку	Баланс металл	Всего на 1 дет. кг.	Вес на 100 шт.кг.	% к весу	
				поковка	заготовка				Поковка(100шт)				
				4,29					Концы некратности				
				Металлопрокат		Количество деталей из 1 поковки		1	Обсечка и облой				
				Длина по ГОСТу (от до)	Длина расчетная Гр	Количество деталей из поковок и поковка из 1 заготовки		1	Угар				
				СЛИТОК его размеры и вес	Выход годного и коэффициент использования металла			Образцы на наладку					
					Выход годного, вес поковки/норма расхода		Вес детали/ норма расхода	Образцы на мех. исп. и макро					
				Защищенные концы и другие отходы									
				Всего									
№№ п/п	Наименование операций и переходов	Оборудование		Наименование инструмента и приспособлений	Тепловой режим		Количество ударов или нажатий	Норма времени на 1 шт. в мин.	Рабочая сила				Примечания
		наименование	тоннаж		Температура нагрева и охлаждения	Время нагрева			Професс ия	Разряд	Часовая ставка	К-во	
005	Контроль												
010	Отрезка: отрезать заготовку												
015	Контроль:												
020	Нагрев												
025	Контроль												
030	Объемная штамповка: штамповка в презварительном и окончательном ручьях												
035	Обрезка: обрезать облой												
040	Термообработка												
045	Слесарная обработка												
050	Контроль												

Рис. 3.21. Технологическая карта

Объем расчетной заготовки равен объему поковки с заусенцем $V_3 = F_3 M$, тогда средней расчетной заготовкой называют цилиндр диаметром d_{cp} , длиной, равной длине поковки ($L_{пок} = l_3$), и объемом $V_{з.пок}$, равным сумме объемов поковки $V_{пок}$ и заусенца V_3 . Исходя из этого

$$V_{з.пок} = V_{пок} + V_3 = V_3,$$

где V_3 – объем поковки с заусенцем, примерно равный объему расчетной заготовки.

Тогда площадь сечения средней расчетной заготовки можно найти по формуле

$$S_{cp} = \frac{V_{р.заг}}{L_{пок}} = \frac{V_3}{l_3},$$

а диаметр средней расчетной заготовки будет равен

$$d_{cp} = 1,13 \sqrt{S_{cp}}.$$

Просмотреть результаты расчетов можно, выбрав лист «Расчетная заготовка» в таблице параметров.

Итогом работы программы является сформированная технологическая карта. Просмотреть и вывести на печать технологическую карту можно с листа «Технологическая карта» таблицы параметров (рис. 3.21).

Контрольные задачи

Спроектировать технологический процесс в САПР RYCHAG.

Номер задания	Условия задачи	Материал изделия
1	$D = 100$ мм, $d = 50$ мм, $H = 60$ мм, $D_1 = 70$ мм, $d_1 = 40$ мм, $H_1 = 50$ мм, $A = 140$ мм, $L = 300$ мм.	Сталь 35
2	$D = 80$ мм, $d = 40$ мм, $H = 50$ мм, $D_1 = 60$ мм, $d_1 = 30$ мм, $H_1 = 40$ мм, $A = 130$ мм, $L = 290$ мм.	40XH
3	$D = 70$ мм, $d = 30$ мм, $H = 70$ мм, $D_1 = 100$ мм, $d_1 = 50$ мм, $H_1 = 90$ мм, $A = 90$ мм, $L = 400$ мм.	Сталь 40
4	$D = 70$ мм, $d = 40$ мм, $H = 70$ мм, $D_1 = 90$ мм, $d_1 = 50$ мм, $H_1 = 80$ мм, $A = 100$ мм, $L = 410$ мм.	30XMA
6	$D = 100$ мм, $d = 50$ мм, $H = 60$ мм, $D_1 = 70$ мм, $d_1 = 40$ мм, $H_1 = 50$ мм, $A = 90$ мм, $L = 320$ мм.	40XH2MA

7	D = 80 мм, d = 40 мм, H = 70 мм, D ₁ = 120 мм, d ₁ = 60 мм, H ₁ = 70 мм, A = 100 мм L = 360 мм	Сталь 45
8	D = 100 мм d = 50 мм H = 80 мм, D ₁ = 120 мм d ₁ = 60 мм H ₁ = 90 мм, A = 110 мм, L = 400 мм.	40ХГС
9	D = 80 мм, d = 40 мм, H = 80 мм, D ₁ = 100 мм, d ₁ = 50 мм, H ₁ = 50 мм, A = 100 мм, L = 350 мм.	20ХН
10	D = 90 мм, d = 50 мм, H = 70 мм, D ₁ = 120 мм, d ₁ = 65 мм, H ₁ = 95 мм, A = 100 мм, L = 410 мм.	Сталь 40

3.3. САПР листовой штамповки (САПР KARTA)

Данная САПР была разработана с использованием алгоритмов и формул расчета характеристик формоизменения и энергосиловых параметров листовой штамповки, изложенных в работах [4; 9]. Она позволяет определить основные технологические параметры при заданной последовательности листоштамповочных операций и сформировать на их основе технологическую карту процесса вытяжки [1].

Общее описание САПР

Головная программа KARTA предназначена для создания базы данных технологических карт на процессы холодной листовой штамповки осесимметричных деталей и деталей типа «Коробка» и управления комплексом подпрограмм технологических расчетов. Структурная схема программы приведена на рис. 3.22.

В программе предусмотрены технологические расчеты разделительных и формоизменяющих операций листовой штамповки, таких как вырубка, вытяжка, гибка, формовка и др.

Ввод исходных данных

Работа с программой производится в режиме диалога. После запуска файла KARTA.BAT на экране появляется окно, в котором пользователю предлагается ввести имя создаваемой карты, свою фамилию, номер цеха, наименование и номер чертежа детали (рис. 3.23).

В следующем окне производится выбор нужного материала (рис. 3.24).

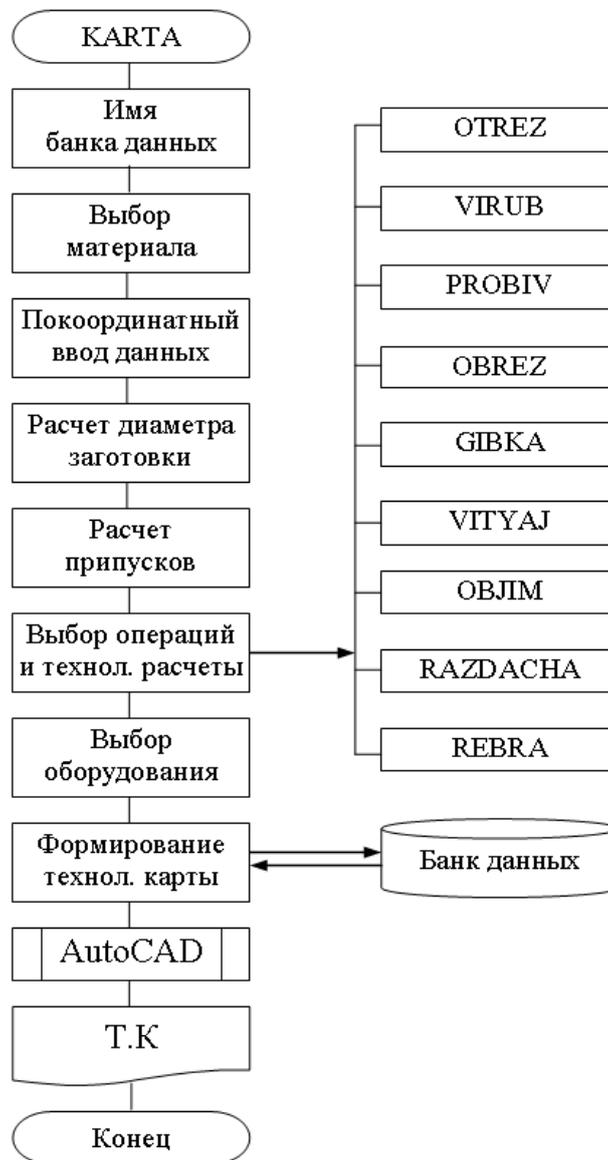


Рис. 3.22. Блок-схема программы КАРТА

Если необходимого материала нет в базе, то его марку и параметры можно ввести с клавиатуры. Затем пользователь вводит контур детали через прямоугольные координаты с радиусами скругления. После ввода координат, которые при необходимости можно откорректировать, нужно сделать расчет диаметра плоской заготовки (рис. 3.25) и расчет или назначение припусков на обрезку. После этого необходимо провести раскрой выбранного листа (ленты). В зависимости от рассчитанного диаметра плоской заготовки можно выполнить либо параллельный, либо шахматный раскрой, который при не-

обходимости можно повторить (рис. 3.26). Затем на экране появляется меню со списком основных и вспомогательных технологических операций листовой штамповки.

Введите имя создаваемой карты

kr2365

Ваша карта находится под именем kr2365.dan

Введите:

свою фамилию Иванов

номер цеха 4

наименование детали стакан

номер чертежа детали 34723

Рис. 3.23. Окно ввода данных пользователя

Выборите наименование металла

СТАЛИ
ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Выборите марку стали

C-1
C-2
C-3
C-4
C-5
C-6
C-7
НЕТ

Выборите наименование стали

Темнолегированная углеродистая обыкновенного качества (ГОСТ 380-71)

Темнолегированная углеродистая качественная конструкционная (ГОСТ 1050-74)

Легированная низколегированная конструкционная (ГОСТ 19282-73)

Темнолегированная легированная конструкционная (ГОСТ 1542-71)

Легкая низколегированная и коррозионно-стойкая сталь (ГОСТ 4586-79)

Нет нужного наименования

ESC - Выход в предыдущее окно

Рис. 3.24. Окно выбора материала

Диаметр плоской заготовки :	Координаты следует вводить, начиная от центра бывшей заготовки (точка с координатами (0,0,0)) и двигаясь по обходу контура детали про- тив часовой стрелки в мм. Все коор- динаты должны вводиться по средней линии. В координату точки (X, Y, R), входит: X - значенная абсцисса точки , Y - значенная ордината, R - радиус закругления. ENTER - после каждого введенного значения.
*** D- 172.284mm ***	
нет данных по пропускам	
Thank you !	

Введенный эквивалентный диаметр:
D-175

Рис. 3.25. Окно для расчета диаметра плоской заготовки

Выборете вид раскрой	Вводите для ленты
Параллельный	шифру В-180
Нормальный	длину L-1200
L	ГОСТ 501-81
ЛИСТ	На данной ленте выдает 7 деталей
ЛЕНТА	Для 1000 деталей необходимо 142.86 ленты
	Норма расхода Нр-30857.1
	КОМ (при пл.дет. равной пл.заг.) 77.9
	Повторите раскрой (Y/N)

Рис. 3.26. Окно для расчета раскроя материала

Пользователь, выбрав определенную последовательность операций, производит по каждой из них необходимые технологические расчеты (рис. 3.27), а также расчеты промежуточных размеров. Здесь же происходит выбор оборудования и инструмента (рис. 3.28) и формирование пооперационных записей в базе данных.

После того, как все расчеты по каждой из операций будут завершены, начинается передача сформированных записей из базы данных в AutoCAD с помощью интерфейсной программы. В AutoCAD

технолог делает корректировку, дополняет и окончательно формирует технологическую карту (рис. 3.29) и пооперационные эскизы. Сформированная технологическая карта сохраняется в базе данных готовых технологических карт и при необходимости ее можно распечатать на принтере.

```

Дiameter плоской заготовки :
*** D- 175.000мм ***

Выборка строкой нужную операцию

----- В М Т Я Ж К А -----

Diameter после 3 вытяжки d(3) - 60.000 мм
Высота после 3 вытяжки h(3) - 112.6 мм
Усилия 3-й вытяжки P(3) - 16.7 кН

Для продолжения нажмите <Enter>

      Выход

Усилия выбулки -- 303.127 кН
  
```

Рис. 3.27. Окно для технологических расчетов

```

Выборка тип оборудования
-----
Крепильная пресса
Гидравлическая пресса
Ножницы

Усилиями
-----
6,3
16
25
40
63
100
НЕТ

Выборка модель пресса
-----
K2118B
Размер стола, мм 300x200
Закрытая высота, мм 170
Ход ползуна, мм 5-45
Число ходов, мм 150-250
K2118
Размер стола, мм 300x200
Закрытая высота, мм 200
Ход ползуна, мм 5-50
Число ходов, мм 150-250
K2118B
Размер стола, мм 300x200
Закрытая высота, мм 170
Ход ползуна, мм 5-45
Число ходов, мм 150-250
НЕТ НУЖНОГО ПРЕССА

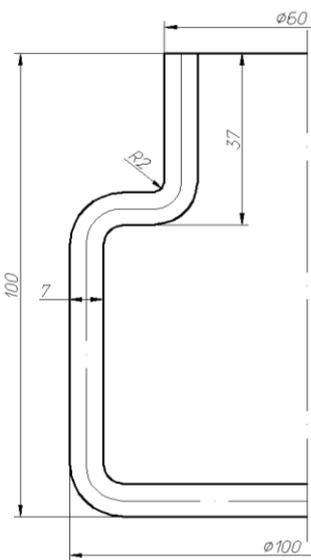
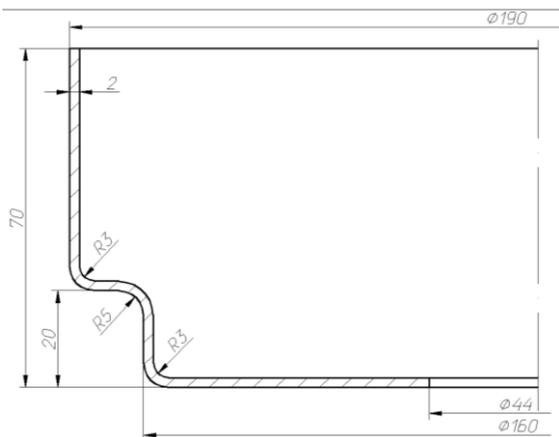
ESC - Возврат в предыдущее окно
  
```

Рис. 3.28. Окно для выбора оборудования

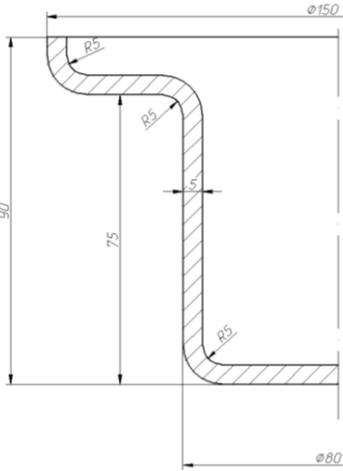
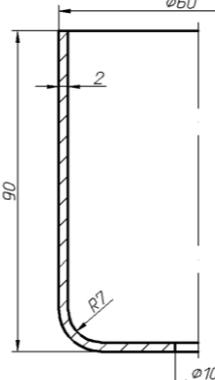
Таким образом, в программе реализовано последовательное построение технологического процесса листовой штамповки с выполнением необходимых расчетов в автоматизированном режиме.

Контрольные задачи

Спроектировать технологический процесс и сформировать технологическую карту изготовления детали согласно варианту в САПР КАРТА.

Номер задания	Условия задачи	Материал изделия
1	<p style="text-align: center;">2</p> 	3 Ст3
2		Ст2

<p>3</p>	<p>Technical drawing of a pipe fitting. The drawing shows a vertical section of a pipe with an outer diameter of $\phi 190$ and a height of 70. The pipe has a wall thickness of 2. The bottom of the pipe is rounded with a fillet radius of $R7$. A horizontal section of the pipe extends from the bottom, with an inner diameter of $\phi 50$ and an outer diameter of $\phi 120$.</p>	<p>Ст3</p>
<p>4</p>	<p>Technical drawing of a pipe fitting. The drawing shows a vertical section of a pipe with an outer diameter of $\phi 90$ and a height of 70. The pipe has a wall thickness of 5. The bottom of the pipe is rounded with a fillet radius of $R3$. A horizontal section of the pipe extends from the bottom, with an inner diameter of $\phi 44$ and an outer diameter of $\phi 70$. The horizontal section has a fillet radius of $R1$.</p>	<p>08кп</p>
<p>5</p>	<p>Technical drawing of a pipe fitting. The drawing shows a vertical section of a pipe with an outer diameter of $\phi 120$ and a height of 80. The pipe has a wall thickness of 5. The bottom of the pipe is rounded with a fillet radius of $R5$. A horizontal section of the pipe extends from the bottom, with an inner diameter of $\phi 30$ and an outer diameter of $\phi 80$. The horizontal section has a fillet radius of $R2$.</p>	<p>10кп</p>

6		15кп
7		Ст5

3.4. САПР проектирования штампов (САПР STAMP)

САПР STAMP [1] предназначена для проектирования штампов простого действия для вырубki круглых деталей и пробивки круглых отверстий и реализована с помощью объектно-ориентированной среды программирования Delphi.

Общее описание программы

Разработка технологического процесса штамповки и выбор той или иной схемы штампа тесно связаны между собой. Установив последовательность штамповки и выбрав схему штампа, обеспечивающие получение изделия, приступают к конструктивному оформлению (проектированию) принятых схем. Конструктивное оформление ведется обычно для конкретного прессы или группы однородных прессы с учетом требований действующих ГОСТов и нормалей на блоки

и пакеты, на крепежно-установочные детали и пружины, на упоры, ловители и другие детали, а также на заготовки для матриц, съемников, пуансонодержателей и пуансонов. Программа содержит базу данных более ста элементов штамповой оснастки.

Конструирование штампов – довольно долгий и трудоемкий процесс. Использование САПР STAMP позволяет значительно сократить сроки разработки конструкторской документации (КД) при проектировании штампов.

Общая структура алгоритма и исходные данные для расчетов

Алгоритм САПР STAMP включает в себя выполнение следующих процедур.

1. *Выбор материала.* В разделе «Выбор материала» (рис. 3.30) необходимо задать ГОСТ, марку и толщину материала.

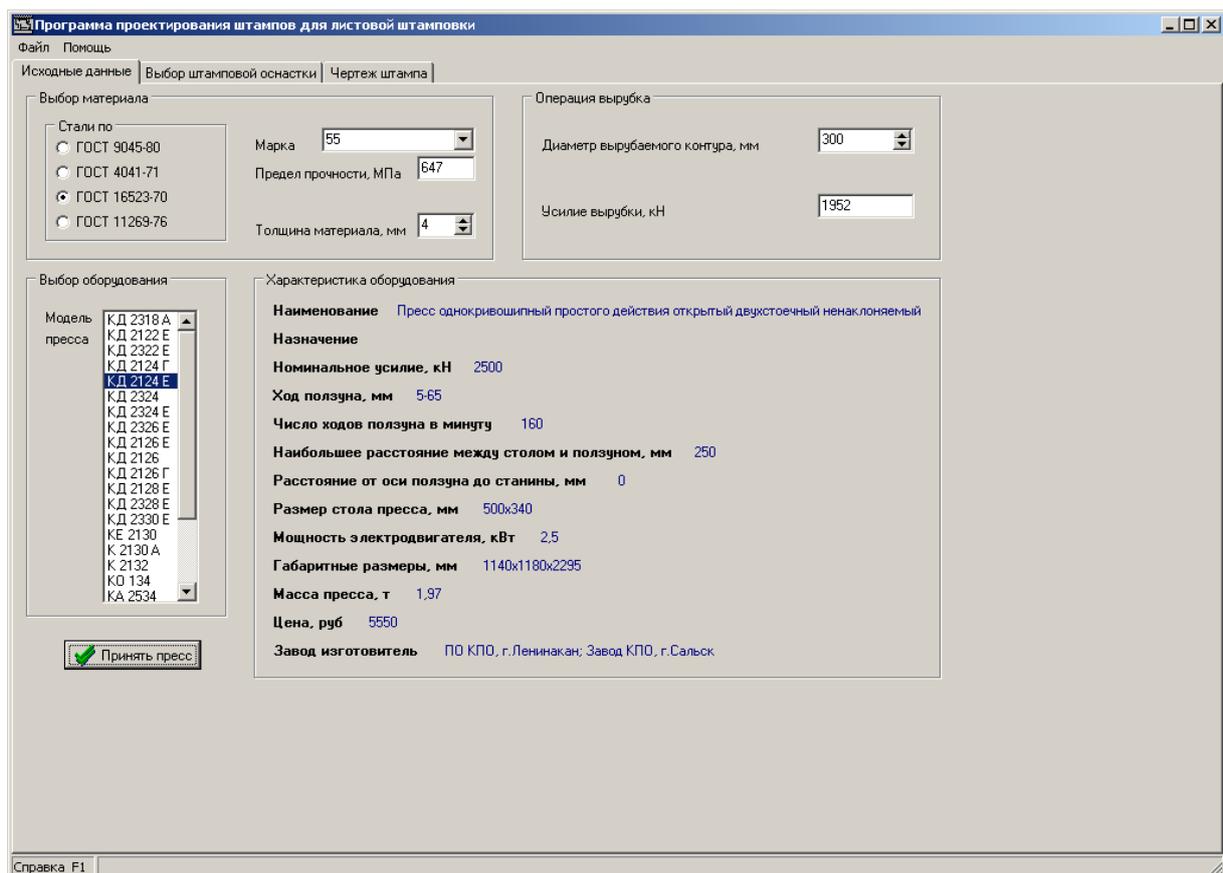


Рис. 3.30. Закладка «Исходные данные»

2. *Выбор диаметра вырубаемой заготовки.* В разделе «Операция вырубка» нужно ввести диаметр вырубаемой заготовки. Расчет-

ное усилие вырубки, по которому выбирается оборудование, определяется автоматически.

3. *Расчет усилия вырубки и выбор пресса.* По определенному усилию вырубки в разделе «Выбор оборудования» выбирают пресс.

4. *Выбор матрицы.* В разделе «Выбор матрицы» (рис. 3.31) задают ее размеры, внутренний и наружный диаметры и высоту.

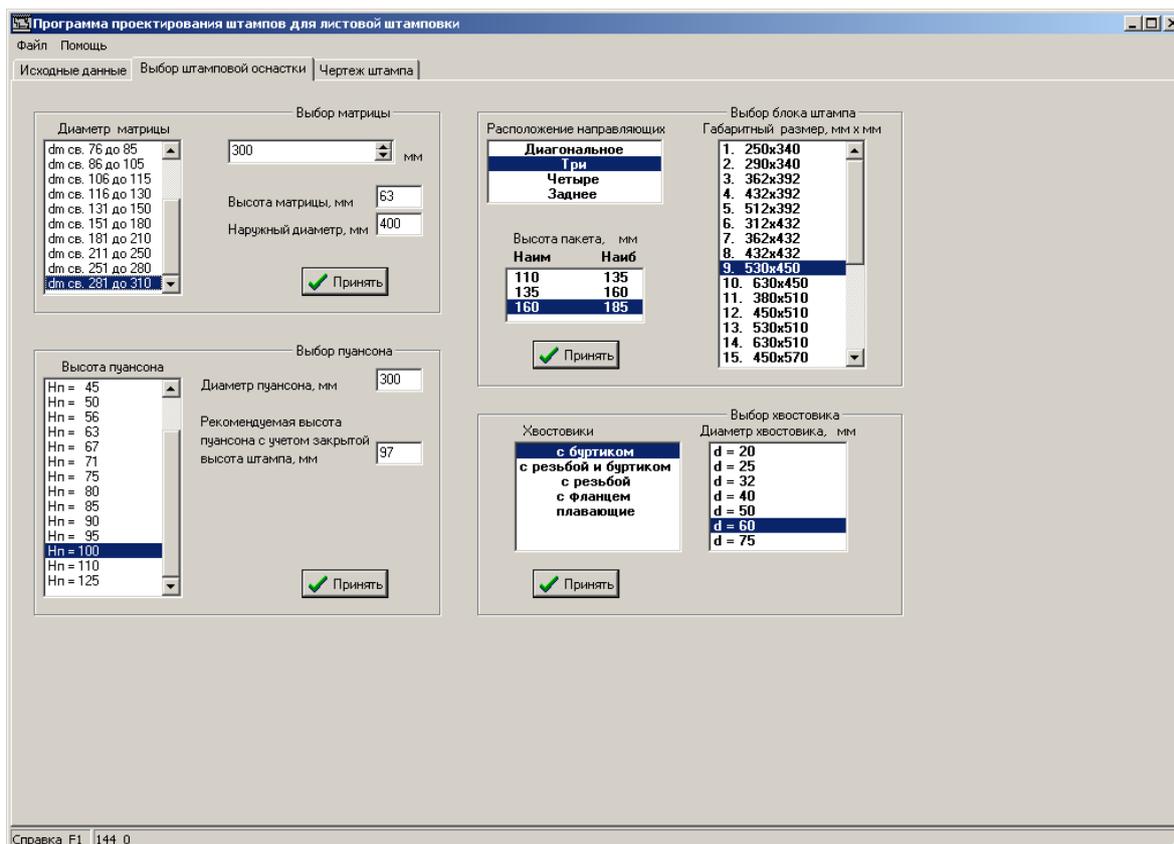


Рис. 3.31. Закладка «Выбор штамповой оснастки»

5. *Выбор блока штампа.* В разделе «Выбор блока штампа» указывают расположение направляющих колонок (диагональное, три, четыре или заднее), выбирают габаритные размеры блока штампа и высоту пакета.

6. *Выбор пуансона.* В разделе «Выбор пуансона» задают высоту пуансона с учетом закрытой высоты штампа.

7. *Выбор хвостовика.* В разделе «Выбор хвостовика» выбирают хвостовик (с буртиком, с резьбой и буртиком, с резьбой, с фланцем либо плавающий) и диаметр его рабочей части.

8. *Формирование чертежа штампа.* На закладке «Чертеж штампа» формируется графическое изображение спроектированного штампа (рис. 3.32). Передача изображения штампа в AutoCAD осуще-

ствляется в меню «Файл – Сохранить» либо нажатием функциональной клавиши F2.

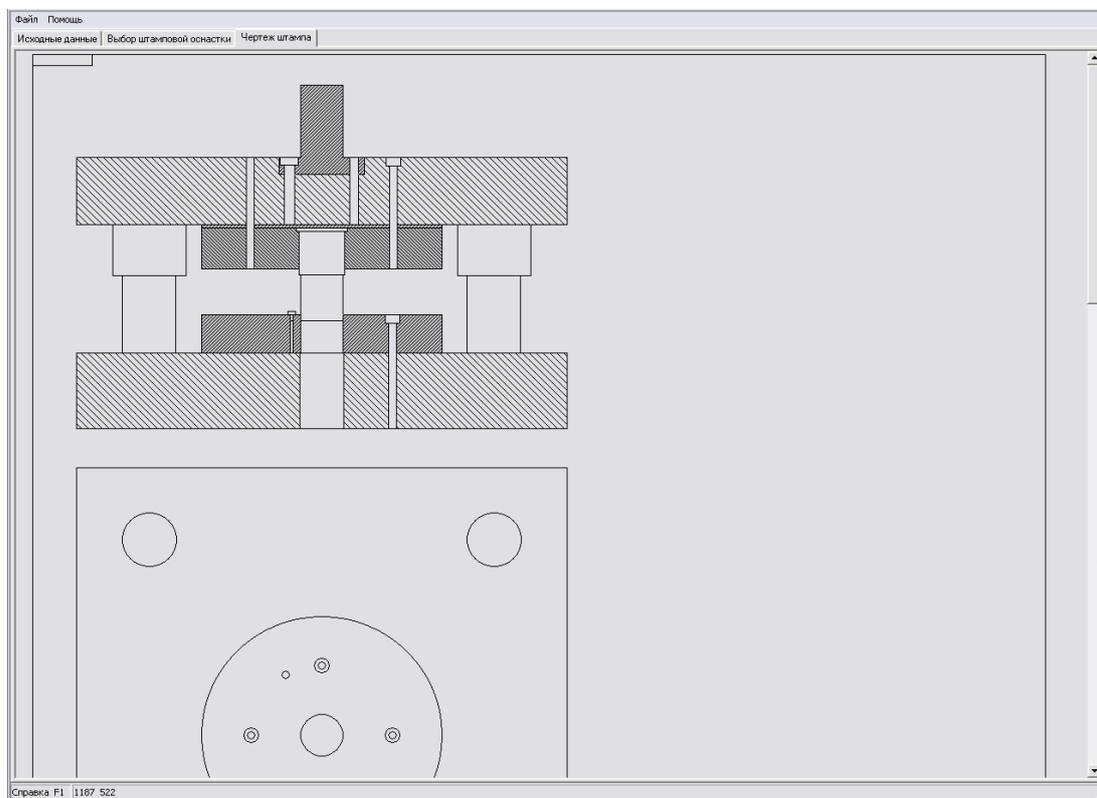


Рис. 3.32. Закладка «Чертеж штампа»

Таким образом, разработанная САПР позволяет получить навыки проектирования штампов для разделительных операций листовой штамповки.

Контрольные задачи

Номер задания	Условия задачи	Сталь	Расположение направляющих
1	2	3	4
1	Спроектировать штамп для вырубке детали диаметром 70 мм и толщиной 2 мм	08кп ГОСТ 9045–80	Диагональное
2	Спроектировать штамп для вырубке детали диаметром 100 мм и толщиной 4 мм	15 ГОСТ 9045–80	Четыре
3	Спроектировать штамп для вырубке детали диаметром 80 мм и толщиной 1 мм	Ст2кп ГОСТ 16523–70	Заднее

4	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 200 мм и толщиной 3 мм	40 ГОСТ 4041–71	Три
5	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 250 мм и толщиной 2 мм	10кп ГОСТ 4041–71	Диагональное
6	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 75 мм и толщиной 3 мм	30ХГСА ГОСТ 11269–76	Четыре
7	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 180 мм и толщиной 4 мм	20 ГОСТ 4041–71	Диагональное
8	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 240 мм и толщиной 3 мм	10кп ГОСТ 9045–80	Четыре
9	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 120 мм и толщиной 2 мм	Ст5кп ГОСТ 16523–70	Диагональное
10	Спроектировать штамп для вырубки детали диаметром 260 мм и толщиной 4 мм	Ст3кп ГОСТ 16523–70	Четыре

Глава 4

ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

4.1. Средства для решения задач математического моделирования

Для моделирования и расчета процессов ОМД используют различные программные средства. Наиболее распространенными программными комплексами для решения этих задач являются MathCAD, Excel, Ansys и LS-Dyna.

MathCAD – математический редактор, позволяющий проводить разнообразные научные и инженерные расчеты, начиная от элементарной арифметики и заканчивая сложными реализациями численных методов. С точки зрения классификации программного обеспечения пакет MathCAD – типичный представитель класса PSE-приложений (problem solution environment – программная среда для решения задач) [34–36]. В состав MathCAD входят несколько интегрированных между собой компонентов:

- мощный текстовый редактор, позволяющий вводить, редактировать и форматировать как текст, так и математические выражения;
- вычислительный процессор, который может проводить расчеты по введенным формулам, используя встроенные численные методы;
- символьный процессор, благодаря которому проводят аналитические вычисления;
- огромное хранилище справочной информации, как математической, так и инженерной, оформленной в качестве интерактивной электронной книги.

После того как MathCAD запущен на исполнение, появляется основное окно приложения, показанное на рис. 4.1. Оно имеет ту же структуру, что и большинство приложений Windows.

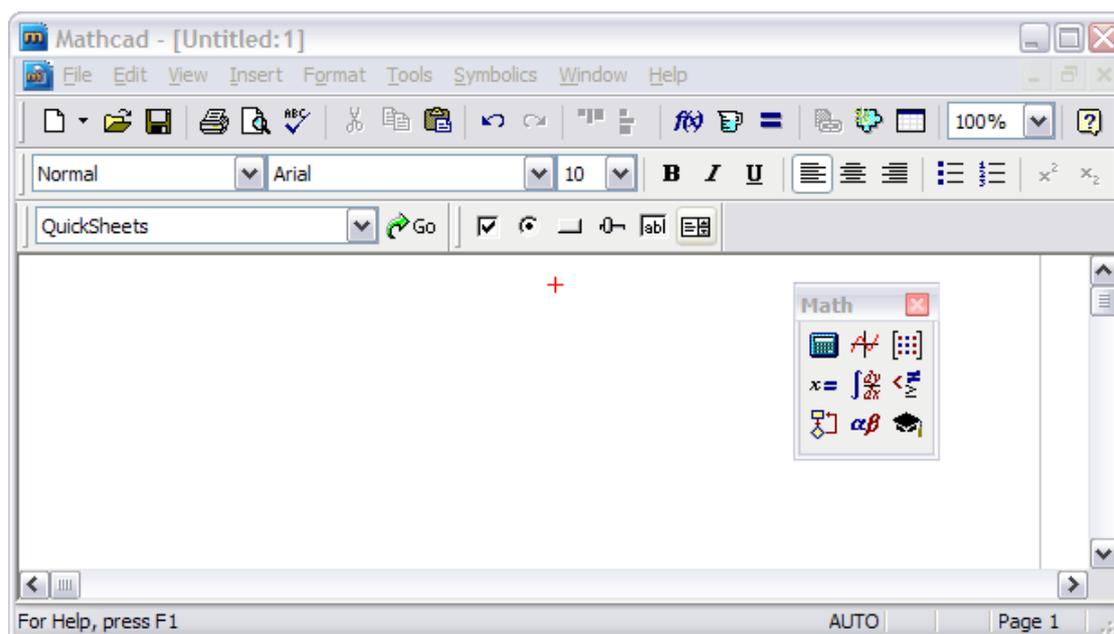


Рис. 4.1. Основное окно MathCAD

Составные элементы интерфейса пользователя MathCAD:

- верхнее меню или строка меню;
- панели инструментов Standard (Стандартная), Formatting (Форматирование), Resources (Ресурсы) и Controls (Элементы управления);
- панель инструментов Math (Математика) и доступные через нее дополнительные математические панели инструментов;
- рабочая область;
- строка состояния;
- всплывающие, или контекстные, меню;
- диалоговые окна или диалоги;
- окна ресурсов MathCAD (MathCAD Resources) со встроенными примерами и дополнительной информацией.

Большинство команд можно выполнить как с помощью меню (верхнего или контекстного), так и панелей инструментов или клавиатуры.

Панели инструментов служат для быстрого выполнения наиболее часто применяемых команд. На рис. 4.2 изображено окно MathCAD с основными панелями инструментов, а также дополнительными математическими панелями.

Основные панели MathCAD:

- Standard (Стандартная) – служит для выполнения большинства операций, таких как действия с файлами, редакторская правка, вставка объектов и доступ к справочным системам;

- Formatting (Форматирование) – для форматирования (изменения типа и размера шрифта, выравнивания и т. п.) текста и формул;
- Math (Математика) – для вызова на экран панелей, с помощью которых происходит вставка математических операций в документы;
- Resources (Ресурсы) – для быстрого вызова ресурсов MathCAD (примеров, учебников, электронных книг и т. п.);
- Controls (Элементы управления) – для вставки в документы стандартных элементов управления интерфейса пользователя (флажков проверки, полей ввода и т. п.).

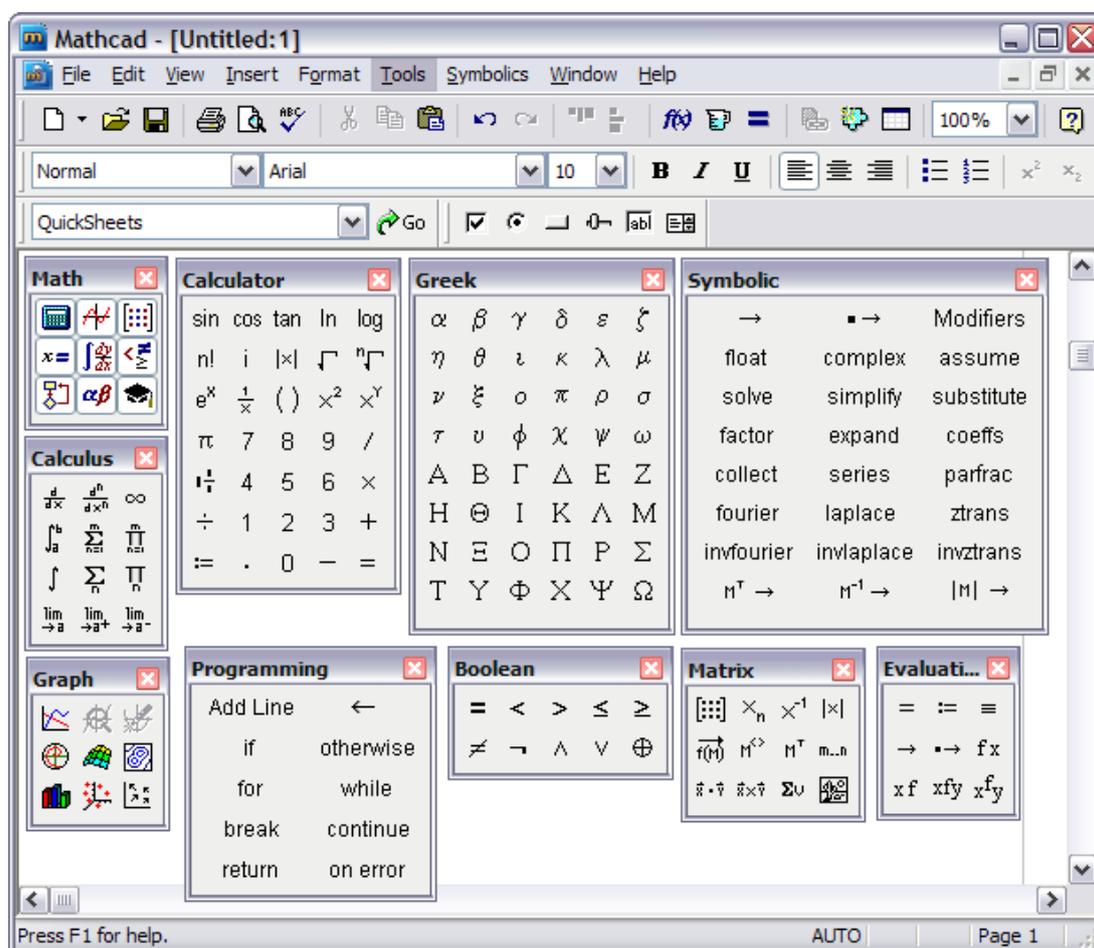


Рис. 4.2. Окно MathCAD с основными и дополнительными математическими панелями

Группы кнопок на панелях инструментов разграничены по смыслу вертикальными линиями – разделителями. При наведении указателя мыши на любую из кнопок рядом появляется всплывающая подсказка – короткий текст, поясняющий назначение кнопки.

Панель Math (Математика) предназначена для вызова на экран еще девяти панелей (рис. 4.2), с помощью которых происходит встав-

ка математических операций в документы. Чтобы отобразить или скрыть какую-либо из них, нужно нажать соответствующую кнопку на панели Math.

Назначение математических панелей:

- Calculator (Калькулятор) – служит для вставки основных математических операций, получила свое название из-за схожести набора кнопок с кнопками типичного калькулятора;

- Graph (График) – для вставки графиков;

- Matrix (Матрица) – для вставки матриц и матричных операторов;

- Evaluation (Выражения) – для вставки операторов управления вычислениями;

- Calculus (Вычисления) – для вставки операторов интегрирования, дифференцирования, суммирования;

- Boolean (Булевы операторы) – для вставки логических (булевых) операторов;

- Programming (Программирование) – для программирования средствами MathCAD;

- Greek (Греческие символы) – для вставки греческих символов;

- Symbolic (Символика) – для вставки символьных операторов.

При наведении указателя мыши на многие из кнопок математических панелей появляется всплывающая подсказка, содержащая сочетание горячих клавиш, нажатие которых приведет к эквивалентному действию. Ввод действий с клавиатуры часто удобнее нажатия кнопок панелей инструментов, но требует большего опыта. Вместе с MathCAD поставляется несколько источников справочной информации, доступ к которым осуществляется через меню Help (Справка) (рис. 4.3).

Справочные системы по вопросам использования MathCAD:

- MathCAD Help – система справки или технической поддержки;

- What's This? – контекстно-зависимая интерактивная справка;

- Developer's Reference – дополнительные главы справки для разработчиков собственных самостоятельных приложений на языке MathCAD;

- Author's Reference – дополнительные главы справки для авторов, разрабатывающих собственные электронные книги MathCAD.

Ресурсы MathCAD – дополнительные материалы, организованные в специфическом формате электронных книг MathCAD с решением множества математических примеров:

- Tutorials – библиотека электронных книг MathCAD с примерами, которые построены в форме обучающих курсов;

- QuickSheets – большое число документов MathCAD, организованных в виде электронной книги, которые удобно использовать в качестве шаблона для собственных расчетов;
- Reference Tables – физические и инженерные таблицы, включающие перечни фундаментальных констант, единиц измерения величин, сводку разнообразных параметров веществ и т. п.;
- E-books – доступ к существующим библиотекам документов пользователя, примерам, а также встроенным электронным книгам, посвященным расширениям MathCAD.

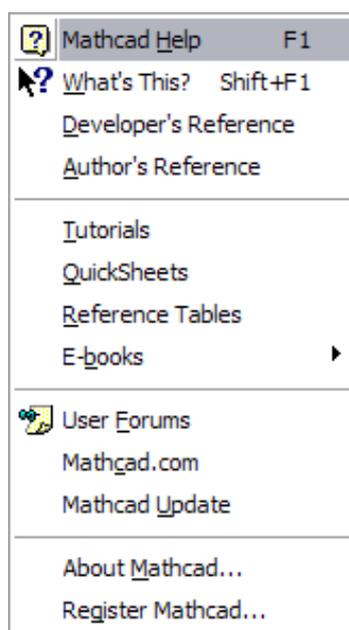


Рис. 4.3. Меню Help

Кроме названных, меню Help содержит следующие пункты:

- User Forums – подключение к специальному интернет-сервису компании MathSoft, дающему возможность пользователям MathCAD общаться между собой, обмениваться программами и получать советы;
- MathCAD.com – переход на официальный сайт приложения MathCAD;
- MathCAD Update – проверка сайта фирмы MathSoft на наличие обновлений MathCAD;
- About MathCAD – вывод информационного окна со сведениями о текущей версии MathCAD и его разработчиках;
- Register MathCAD – регистрация программы через Интернет.

Если в какой-либо момент работы с MathCAD требуется помощь, выберите Help/MathCAD Help, либо нажмите клавишу <F1>, либо кнопку Help со знаком вопроса на стандартной панели инстру-

ментов. Справка в MathCAD является контекстно-зависимой, т. е. ее содержание определяется тем, на каком месте документа она вызвана.

Основы вычислений в MathCAD

Для выполнения простых расчетов по формулам необходимо:

- 1) определить место в документе, где должно появиться выражение, щелкнуть мышью в соответствующей точке документа;
- 2) ввести левую часть выражения. Например, найти арккосинус 0, тогда нужно ввести с помощью клавиатуры $\text{acos}(0)$;
- 3) ввести знак численного равенства = (клавишей $\langle \Rightarrow \rangle$) или символического равенства \rightarrow (сочетанием клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle . \rangle$). В первом случае будет рассчитано численное значение выражения, а во втором (если это возможно) – аналитическое (рис. 4.4).

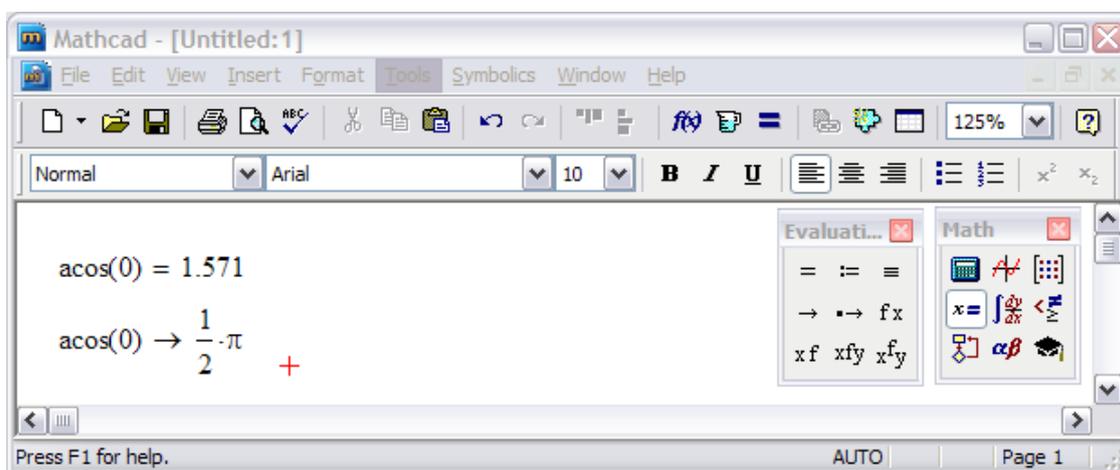


Рис. 4.4. Пример ввода простых формул

Таким образом можно проводить более сложные и громоздкие вычисления, пользуясь при этом всем арсеналом функций, которые заложены разработчиками в систему MathCAD и поэтому называются встроенными функциями (в отличие от пользовательских функций, конструируемых непосредственно при разработке MathCAD-программы). Легче всего вводить имена встроенных функций с клавиатуры, как в примере с вычислением арккосинуса, но, чтобы избежать возможных ошибок в их написании, лучше выбрать другой путь (поскольку многие из них весьма сложны и имеют несколько аргументов, так что сложно запомнить имена и параметры всех функций наизусть).

Ввести встроенную функцию в выражение можно с помощью диалогового окна Insert Function, которое вызывается при нажатии на

кнопку с надписью $f(x)$ на стандартной панели инструментов (рис. 4.5). Далее необходимо в списке Function Category выбрать категорию, к которой принадлежит функция, а в списке Function Name выбрать имя встроенной функции, под которым она фигурирует в MathCAD, и нажать кнопку ОК (для вставки функции и закрытия окна Insert Function) или Insert (только для вставки функции). В случае затруднения с выбором можно ориентироваться на подсказку, появляющуюся при выборе функции в нижнем текстовом поле.

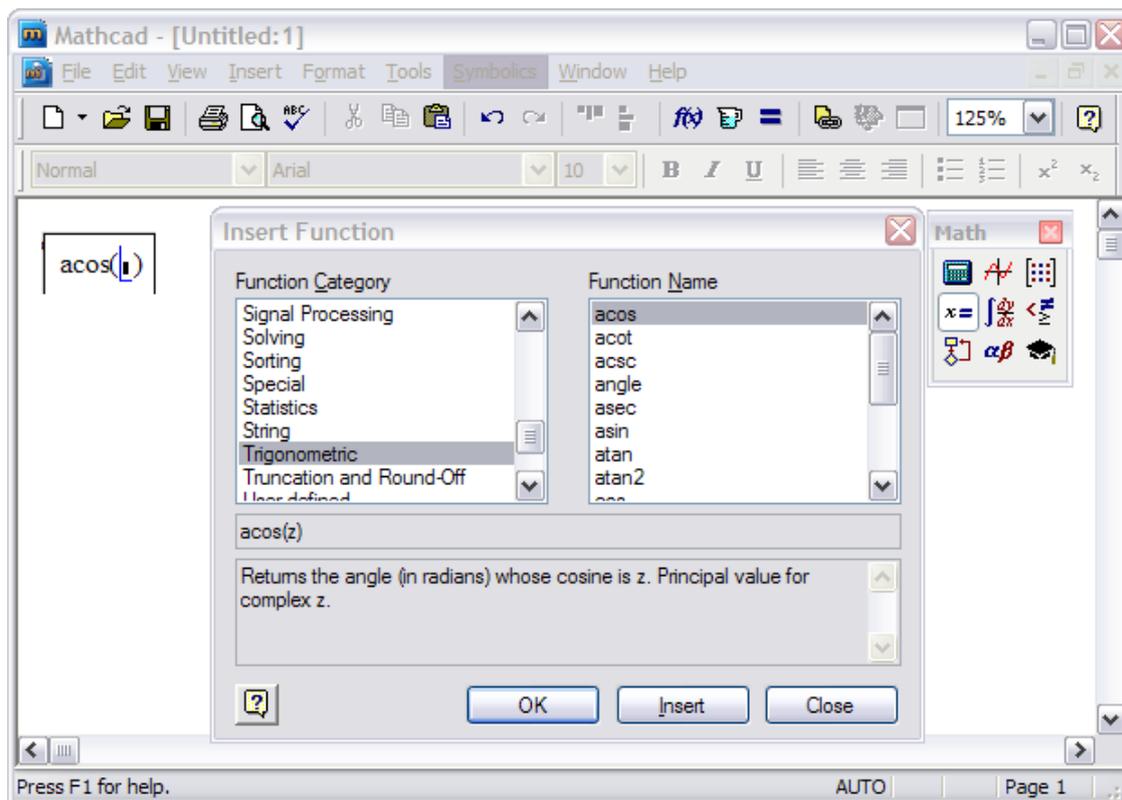


Рис. 4.5. Ввод встроенных функций с помощью диалогового окна Insert Function

По умолчанию вычисления в документе производятся в режиме реального времени, т. е. как только пользователь вводит в формулу оператор численного или символьного равенства, MathCAD пытается вычислить это выражение (и все остальные формулы, находящиеся ниже по тексту). Иногда, в основном в случае сложных и долгих расчетов, бывает полезно остановить их нажатием клавиши <Esc>, а затем (в нужный момент) возобновить нажатием клавиши <F9> или командой Tools/Calculate/Calculate Now.

Описанные ранее действия демонстрируют использование MathCAD в качестве обычного калькулятора с расширенным набором

функций. Для инженера же интерес представляет, как минимум, возможность задания переменных и операций с функциями пользователя. Для того чтобы присвоить некоторой переменной (например переменной x) определенное значение, необходимо ввести выражение типа $x:=10$. Присваивание обозначается не знаком равенства, а специальным символом, чтобы подчеркнуть его отличие от операции численного вывода. Оператор присваивания вводится нажатием клавиши-двоеточия $<:=>$ либо при помощи панели Calculator. Символ равенства $\langle = \rangle$ говорит о вычислении значения слева направо, а символ $\langle := \rangle$ – о присваивании значения справа налево (рис. 4.6).

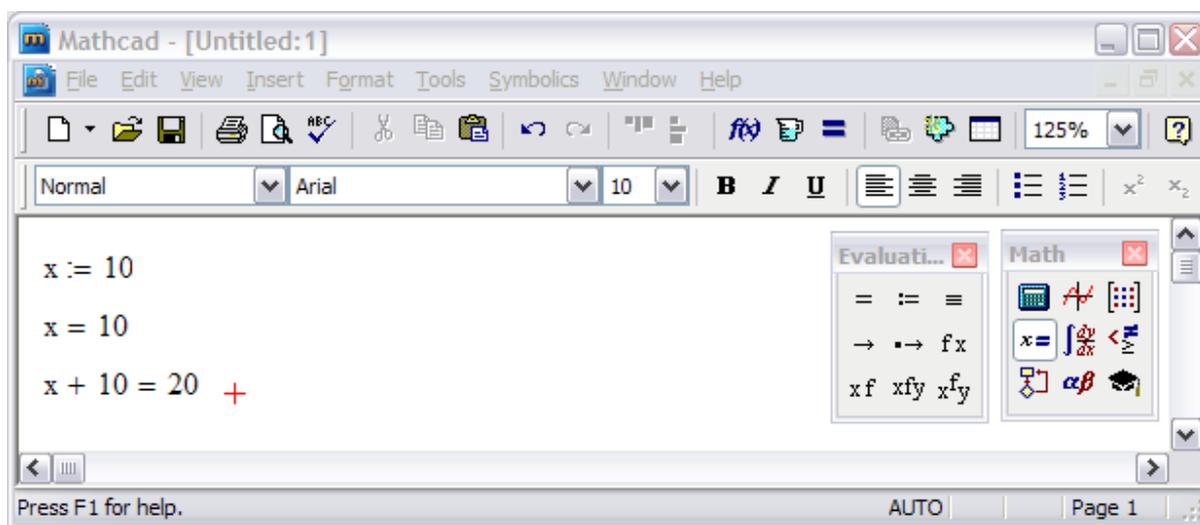


Рис. 4.6. Использование операторов присваивания и равенства

Для того чтобы вычислить значение выражения, содержащего некоторую переменную, например $x+10$, следует просто ввести его, а затем применить оператор численного вывода. Но тогда необходимо, чтобы этой переменной ранее в документе было присвоено какое-либо значение (рис. 4.6).

Помимо оператора обычного присваивания, в MathCAD имеется еще один оператор глобального присваивания (\equiv). Если вставить его для задания значения переменной в любой части документа (например в самом низу), то эта переменная автоматически будет определена в любой части документа.

Подобно присваиванию числовых значений переменным, можно определить функции пользователя одного или нескольких аргументов. На рис. 4.7 показано, как определяется функция и находится решение в заданной точке одной переменной $f(x)$ и трех переменных $f1(a, y, z)$.

Чтобы построить график функций $f(x)$ и $f1(a, y, z)$, нажимают на панели Graph кнопку с нужным типом графика (например двумерный декартов график – X-Y plot) и в появившейся заготовке графика определяют значения, которые будут отложены по осям. В нашем случае требуется ввести x в местозаполнитель возле оси X и $f(x)$ и $f1(10, x, 0)$ возле оси Y (рис. 4.7).

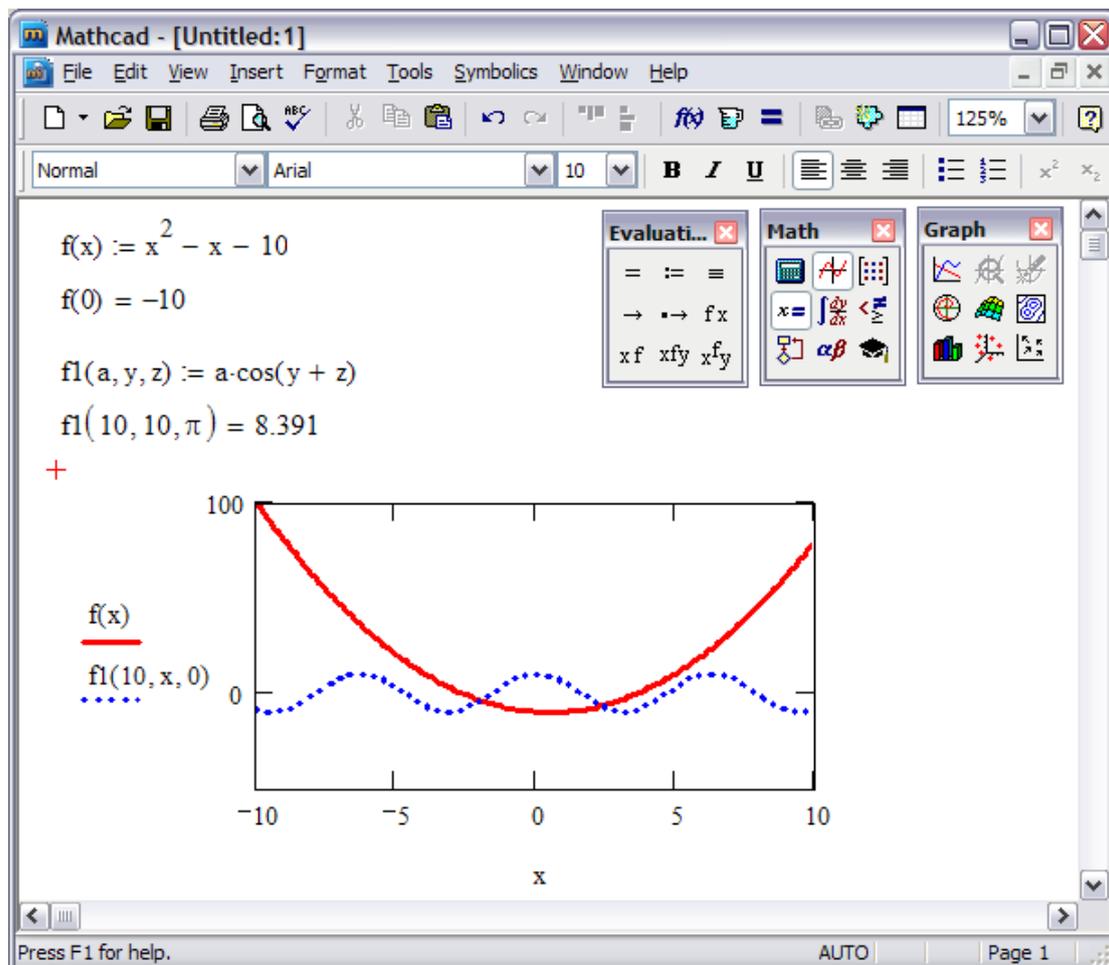


Рис. 4.7. Пример присвоения функций и построение графика

В MathCAD используются основные типы переменных.

1. *Действительные числа* вводятся в двоичной (binary), восьмеричной (octal), десятичной (denary) и шестнадцатеричной (hexadecimal) системах счисления (рис. 4.8).

2. *Комплексные числа* (рис. 4.9) являются суммой действительного и мнимого чисел, получающихся путем умножения любого действительного числа на мнимую единицу (imaginary unit) i или j . По определению полагается $i^2 = -1$. Для ввода мнимой единицы надо нажать клавиши $\langle 1 \rangle$, $\langle i \rangle$. Если просто ввести символ « i », то MathCAD

интерпретирует его как переменную i . Кроме того, мнимая единица имеет вид $1i$ только тогда, когда соответствующая формула выделена. В противном случае мнимая единица отображается просто как i .

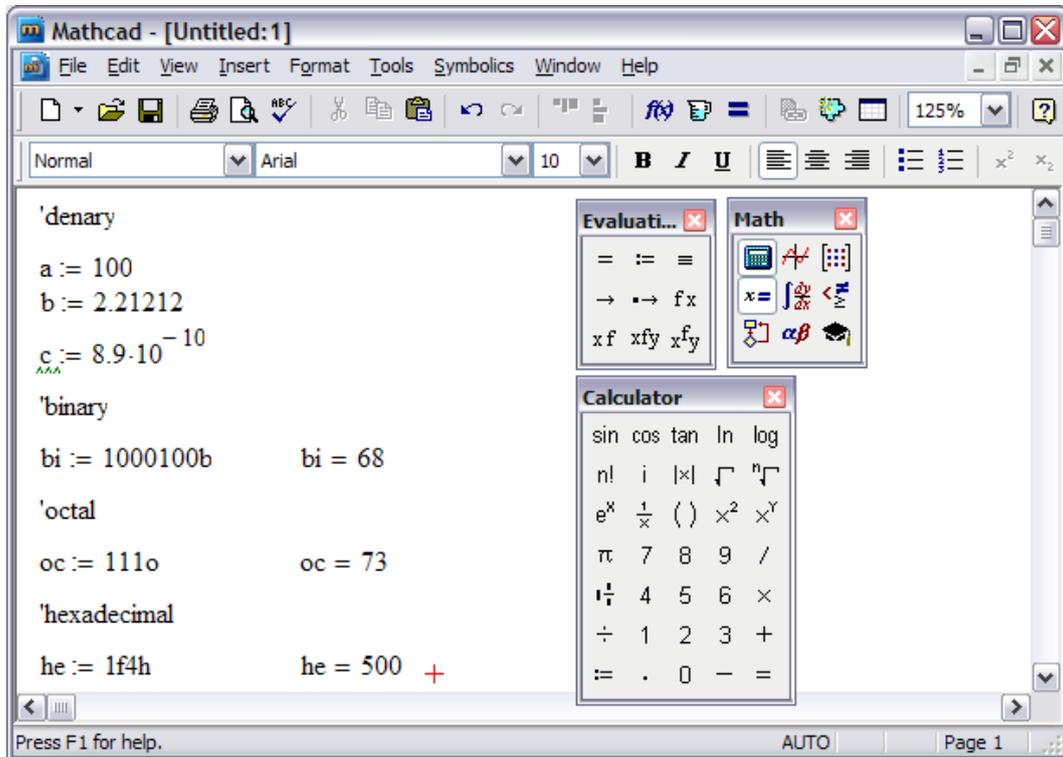


Рис. 4.8. Использование действительных чисел

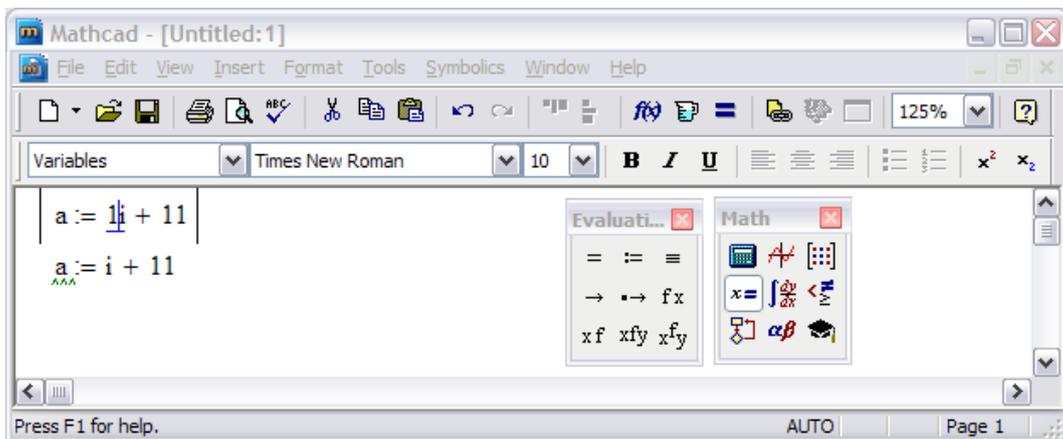


Рис. 4.9. Использование комплексных чисел

3. *Встроенные математические константы* (рис. 4.10) обозначают значения некоторых общеупотребительных специальных математических символов: ∞ – символ бесконечности, e – основание натурального логарифма, π – число «пи», i и j – мнимая единица, % – символ процента.

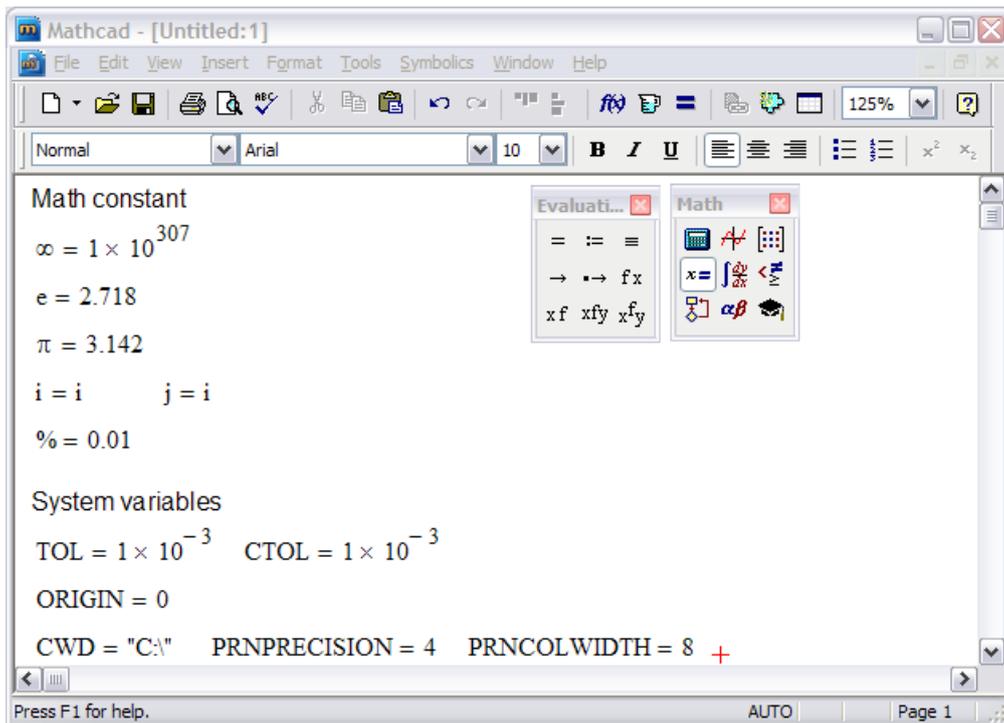


Рис. 4.10. Встроенные константы

Системные (system variables), определяющие работу большинства численных алгоритмов, реализованных в MathCAD: TOL – точность численных методов; CTOL – точность выполнения выражений, используемая в некоторых численных методах; ORIGIN – номер начального индекса в массивах и строковых переменных; PRNPRECISION – установка формата данных при выводе в файл; PRNCOLWIDTH – установка формата столбца при выводе в файл; CWD – строковое представление пути к текущей рабочей папке.

4. *Строковые переменные.* Значением переменной или функции может быть не только число, но и строка, состоящая из любой последовательности символов, заключенной в кавычки.

Приложение MathCAD позволяет использовать в расчетах массивы (arrays), т. е. упорядоченные последовательности чисел.

В MathCAD условно выделяют два типа массивов (рис. 4.11):

1. *Векторы* (одноиндексные массивы a), *матрицы* (двухиндексные b) и *тензоры* (многоиндексные);

2. *Ранжированные переменные* (range variables) – векторы, элементы которых определенным образом зависят от их индекса.

Доступ к любому элементу массива возможен по его индексу, т. е. номеру в последовательности чисел, например a – это массив, a_i – его элемент. Помимо доступа к отдельным элементам массива, имеется возможность совершать действия над его подмассивами (например

векторами-столбцами, образующими матрицу). Делается это с помощью оператора со значком $M^{<>}$ на панели Matrix. Стартовый индекс массива задается системной переменной ORIGIN, которая по умолчанию равна нулю. Если необходимо нумеровать элементы векторов и матриц с единицы, то этой переменной присваивают значение 1.

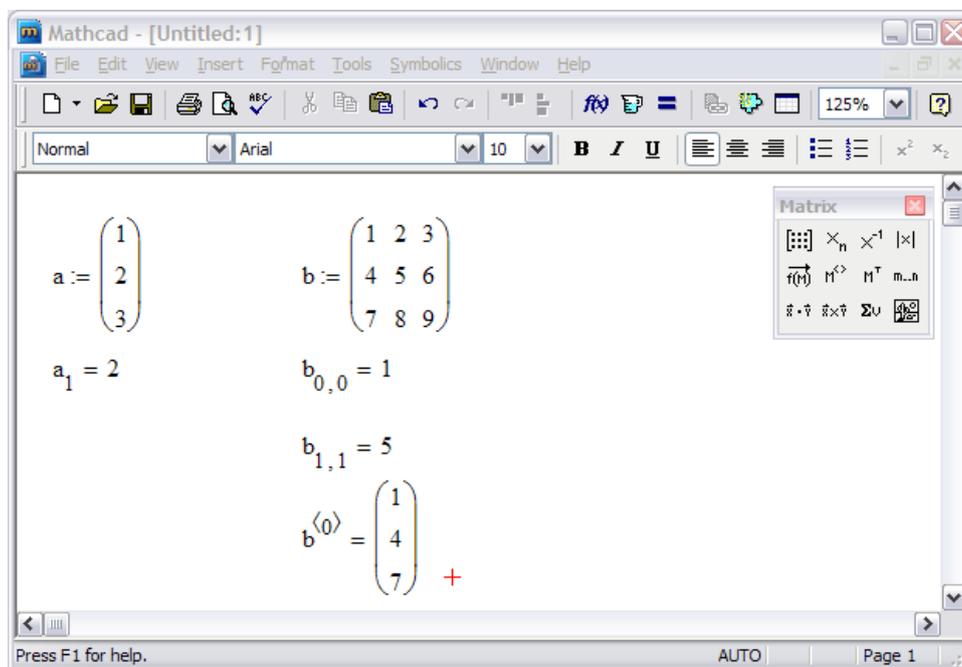


Рис. 4.11. Использование массивов

В MathCAD числовые переменные и функции могут обладать размерностью. Сделано это для упрощения инженерных и физических расчетов. В MathCAD встроено большое количество единиц измерения, с помощью которых и создаются размерные переменные.

Чтобы создать размерную переменную, определяющую, например, силу тока в 10 A , необходимо ввести выражение, присваивающее переменной i значение 10, и затем символ умножения $<*>$, а потом букву «A». Поскольку все символы, обозначающие единицы измерения, зарезервированы и имеют предустановленные значения (связанные с размерностью), то литера A будет распознана MathCAD как Ампер (рис. 4.12). Если ранее была переопределена переменная A , то она восприниматься как единица силы тока уже не будет.

Вставить единицу измерения можно и не вручную, а при помощи средств MathCAD. Для этого выбирают команду Insert/Unit, либо нажимают кнопку с изображением мерного стакана на стандартной панели инструментов. Затем в списке Unit открывшегося диалогового окна Insert Unit выбирают нужную единицу измерения Ampere (A) и

нажимают кнопку ОК. Если выбор конкретной единицы измерения затруднителен, но известна размерность переменной, то нужно найти ее в списке Dimension диалогового окна Insert Unit. Тогда в списке Unit (Единица измерения) появятся допустимые для этой величины единицы измерений.

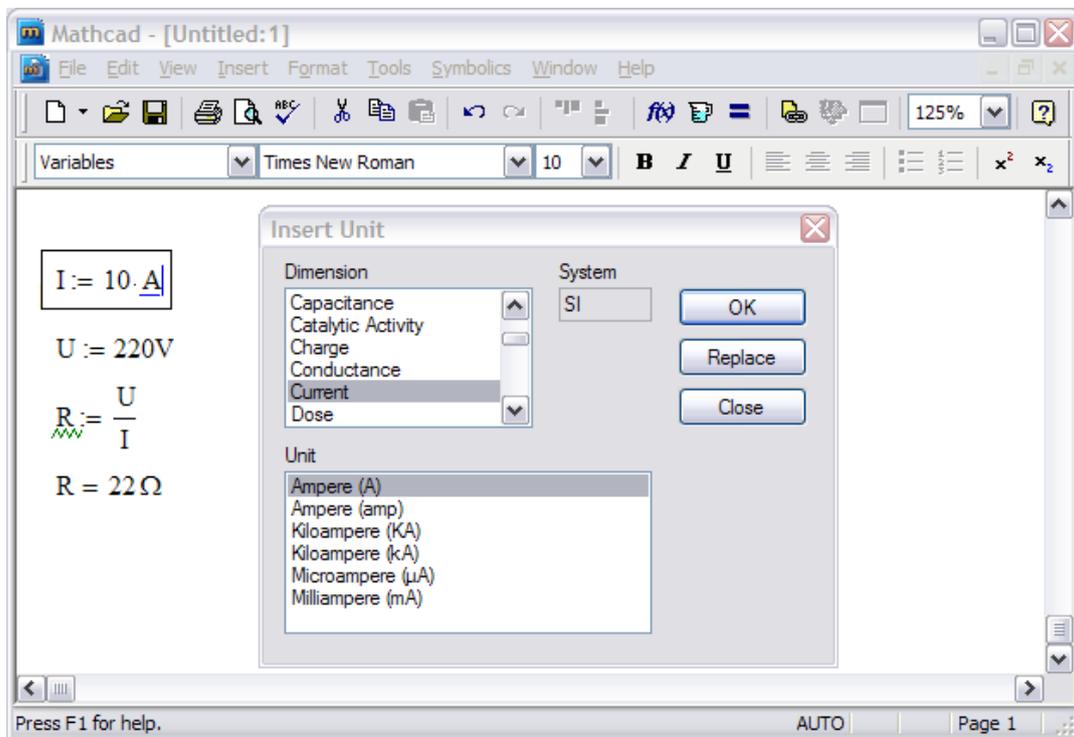


Рис. 4.12. Использование размерных переменных

В следующих модулях будут рассмотрены возможности MathCAD, связанные с решением систем дифференциальных уравнений, реализации моделей на основе интегральных уравнений, регрессионного анализа и обработки результатов полного факторного эксперимента, реализации алгоритмических моделей технологических процессов и объектов ОМД, решения задач одномерной и многомерной оптимизации.

Основные сведения о Microsoft Excel

Microsoft Excel [37] является программой по обработке данных в табличном виде с представлением определенных возможностей для специалистов в области моделирования процессов и объектов ОМД.

1. Обработка больших объёмов экспериментальных данных, включающая операции сортировки, фильтрации, доступа к внешним базам данных и создания сводных таблиц.

2. Проведение расчетов с числовыми рядами, матрицами, комплексными числами.

3. Построение разнообразных диаграмм и графиков, в том числе с отображением погрешностей, отклонений от средних значений, трендов и регрессий.

4. Подбор параметров и поиск решений с применением метода линейной оптимизации.

5. Реализации алгоритмических моделей с использованием языка программирования Visual Basic.

4.2. Реализация в среде MathCAD моделей на основе системы дифференциальных уравнений

Дифференцирование в среде MathCAD

Операция дифференцирования реализована в MathCAD как в численной, так и в аналитической форме, а обозначается при помощи традиционного оператора, т. е. соответствующими математическими символами (подобно сложению или умножению). Если расчеты выполняются с помощью вычислительного процессора, то необходимо хорошо представлять себе особенности численного алгоритма, действие которого остается для пользователя «за кадром». С помощью MathCAD можно вычислять производные скалярных функций любого количества аргументов, причем как функции, так и аргументы могут быть и действительными, и комплексными.

Для аналитического нахождения производной функции необходимо:

- задать функцию, например $f(x) := \sin(x) \cdot \ln(i)$ (рис. 4.13);
- ввести оператор дифференцирования нажатием кнопки Derivative на панели Calculus;
- в появившихся местозаполнителях оператора дифференцирования ввести функцию, зависящую от аргумента x , т. е. $f(x)$, и имя самого аргумента x , а также оператор символьного вычисления для получения ответа.

Пример визуализации операции дифференцирования с помощью графика приведен на рис. 4.13.

Для того чтобы рассчитать производную в точке, необходимо предварительно задать значение аргумента в этой точке (рис. 4.14). Результатом дифференцирования в этом случае будет значение про-

изводной в этой точке. Если результат удастся отыскать аналитически, то он приводится в виде числового выражения, а для того, чтобы получить его в форме числа, достаточно ввести после выданного выражения символ числового равенства.

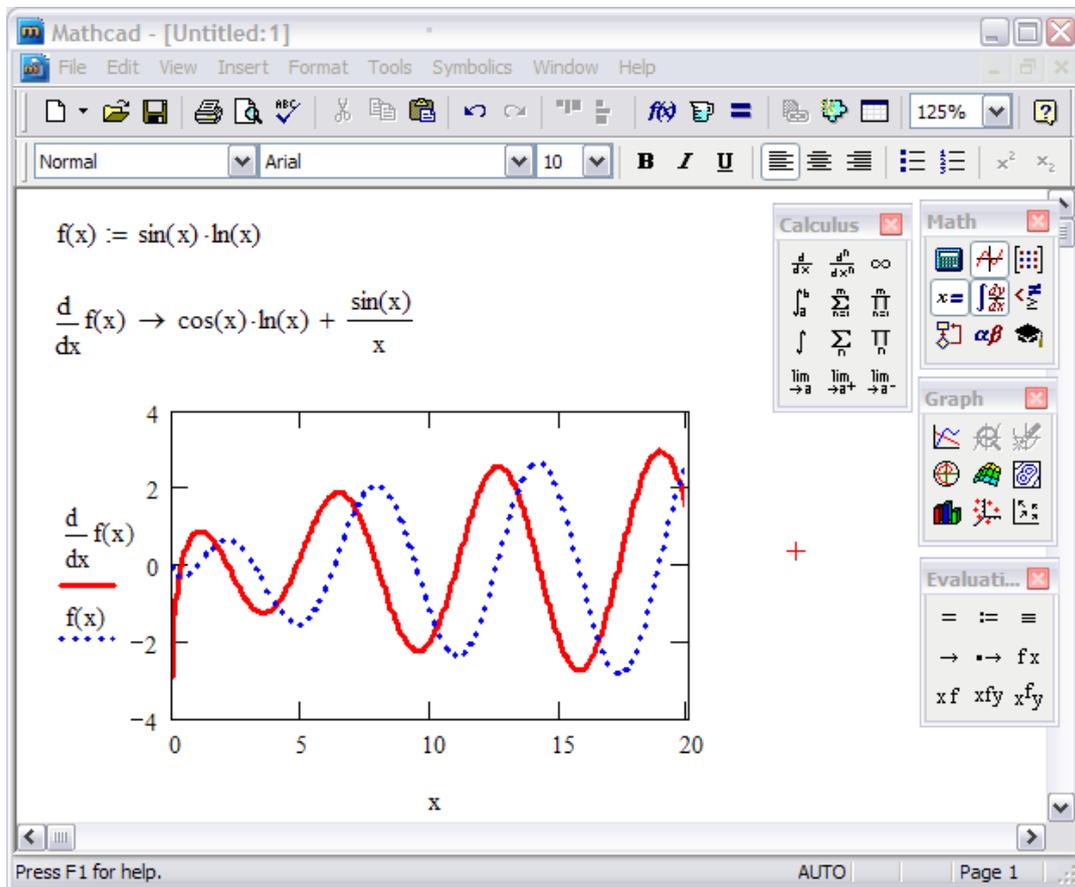


Рис. 4.13. Визуализация операции дифференцирования с помощью графика

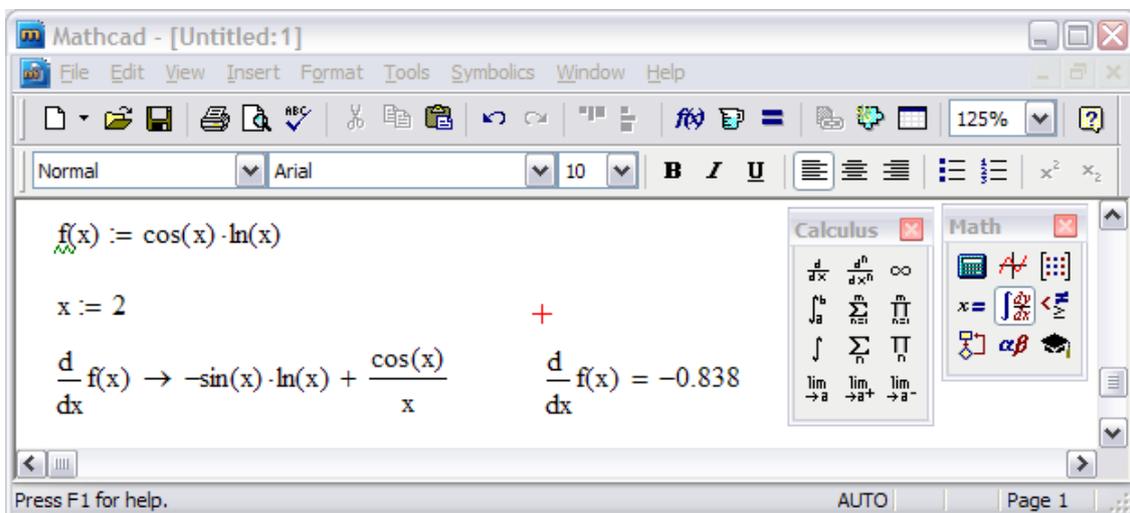


Рис. 4.14. Расчет производной в точке

Оператор дифференцирования, как и любой другой, можно применять для определения собственных функций пользователя. На рис. 4.15 показано как через производную от $f(x)$ определяется еще одна пользовательская функция $g(x)$ и затем, при помощи оператора символьного вывода, находятся ее явный вид и конкретное значение в точке $x = 1$.

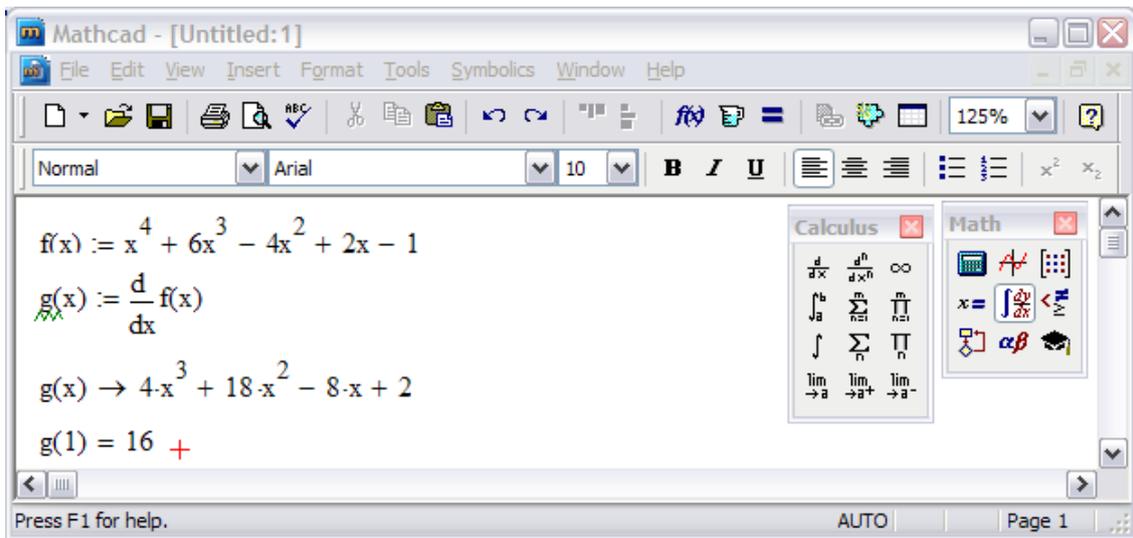


Рис. 4.15. Определение пользовательской функции

MathCAD позволяет численно определять производные высших порядков, от 3-го до 5-го включительно. Чтобы вычислить производную функции $f(x)$ N -го порядка в точке x (рис. 4.16), нужно проделать те же самые действия, что и при взятии первой производной, за тем исключением, что вместо оператора производной необходимо применить оператор N -й производной (Nth Derivative). Этот оператор вводится с той же панели Calculus либо с клавиатуры нажатием клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle ? \rangle$ и содержит еще два дополнительных местозаполнителя, в которые следует поместить число N . В полном соответствии с математическим смыслом оператора определение порядка производной в одном из местозаполнителей приводит к автоматическому появлению того же числа в другом из них.

Очевидно, что производная при $N = 0$ по определению равна самой функции, при $N = 1$ получается обычная первая производная. Для аналитического нахождения производных высших порядков при помощи оператора символьного вывода, не вводят значения аргумента, а при численном вычислении необходимо перед оператором дифференцирования присвоить аргументу функции значение, для которого будет вычисляться производная (рис. 4.16).

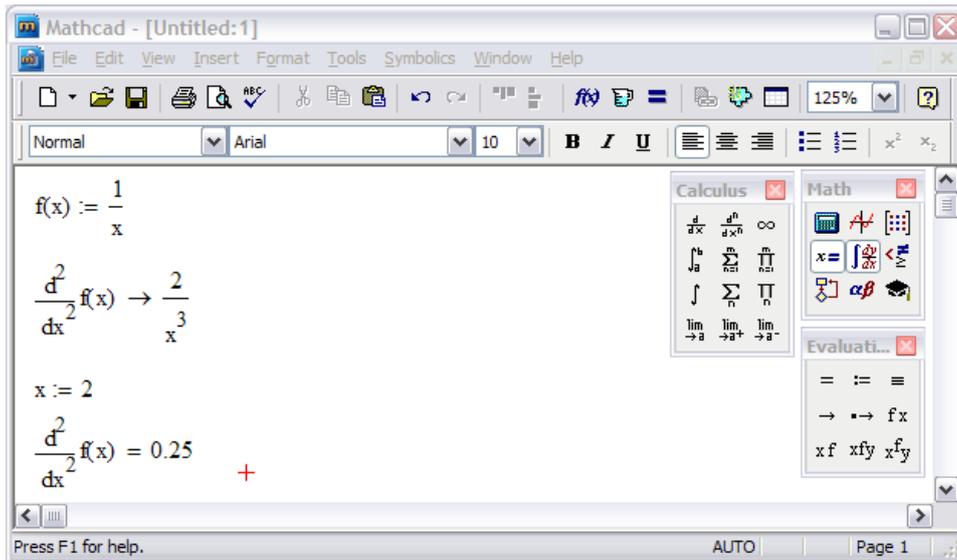


Рис. 4.16. Нахождение производных

Чтобы вычислить производную порядка выше 5-го численно, можно последовательно применить несколько раз оператор N -й производной (рис. 4.17). Однако нужно помнить о том, что численное определение производных высших порядков вычисляют методом Риддера, как и для первых производных. Поскольку в среде MathCAD для первой производной этот метод обеспечивает точность до 7–8 значащих разрядов числа, то при повышении порядка производной на каждую единицу точность падает примерно на один разряд. Попытка численного вывода результата производной 6-го порядка приводит к ошибке.

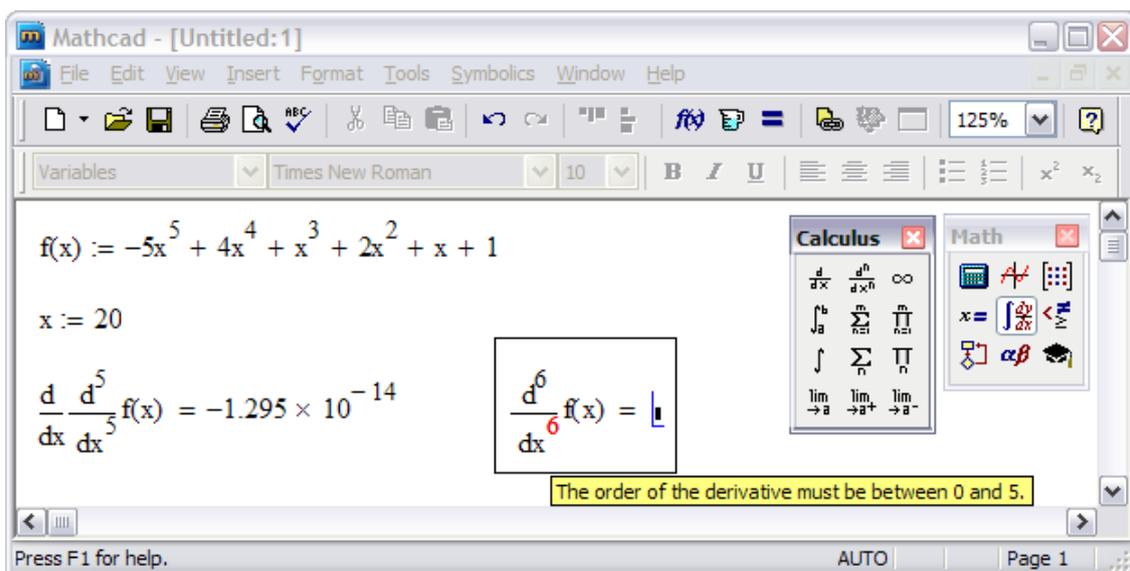


Рис. 4.17. Нахождение производных высших порядков

С помощью MathCAD можно вычислять производные функций не только одного, но и любого количества аргументов. Как известно, производные функции нескольких аргументов по одному из них называются *частными*. Чтобы вычислить частную производную, необходимо, как обычно, ввести оператор производной с панели Calculus и в соответствующем местозаполнителе напечатать имя переменной, по которой должно быть осуществлено дифференцирование. На рис. 4.18 представлен пример, в котором определена функция $f(x, k)$ и рассчитаны её производные по обеим переменным – x и k . Чтобы определить частную производную в точке, необходимо предварительно задать значения всех аргументов.

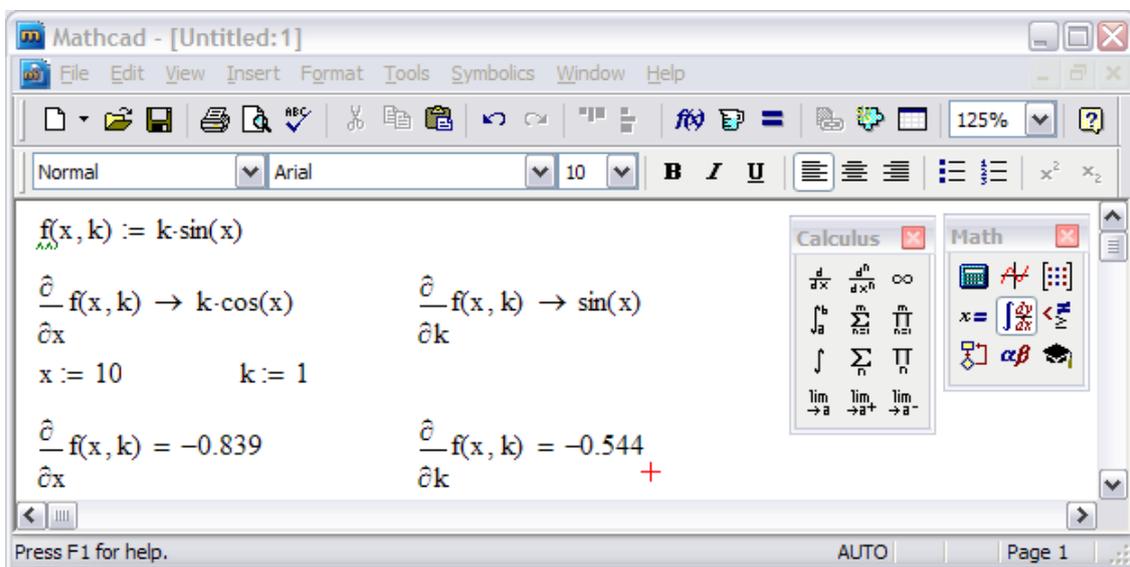


Рис. 4.18. Нахождение частных производных

На рис. 4.18 оператор дифференцирования записан в традиционной форме частной производной (с округлыми символами дифференциала). Запись оператора не влияет на вычисления, а служит лишь более привычной формой представления расчетов.

Для того чтобы изменить вид оператора дифференцирования на представление частной производной, следует:

- вызвать контекстное меню из области оператора дифференцирования нажатием правой кнопки мыши;
- выбрать в контекстном меню верхний пункт View Derivative As;
- в появившемся подменю выбрать пункт Partial Derivative.

Еще одна операция, тесно связанная с дифференцированием, представляет собой разложение функции в ряд Тейлора по любой пе-

ременной x в некоторой точке. Если эта точка $x = 0$, то ряд называют также рядом Маклорена, и он представим в окрестности точки $x = 0$ суммой вида $a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$. Здесь a_i – некоторые коэффициенты, не зависящие от x , но, возможно, являющиеся функциями других переменных, от которых зависит исходная функция.

Именно эти коэффициенты выражаются через производные функции. Если она имеет в точке $x = 0$ особенность, то соответствующее разложение называют рядом Лорана.

При поиске разложения в ряд Тейлора нет необходимости явно рассчитывать все его коэффициенты, поскольку эта операция предусмотрена разработчиками MathCAD и выполняется при помощи символического процессора. При этом можно использовать для ее осуществления как соответствующие встроенные функции, так и меню Symbolics (Символика).

Чтобы разложить некоторое выражение в ряд:

- введите выражение;
- выделите значение переменной, по которой требуется получить разложение в ряд;
- выполните команду Symbolics/Variable/Expand to Series;
- в появившемся диалоговом окне Expand to Series введите желаемый порядок аппроксимации (Order of Approximation) и нажмите кнопку ОК.

Результат разложения появится под выражением.

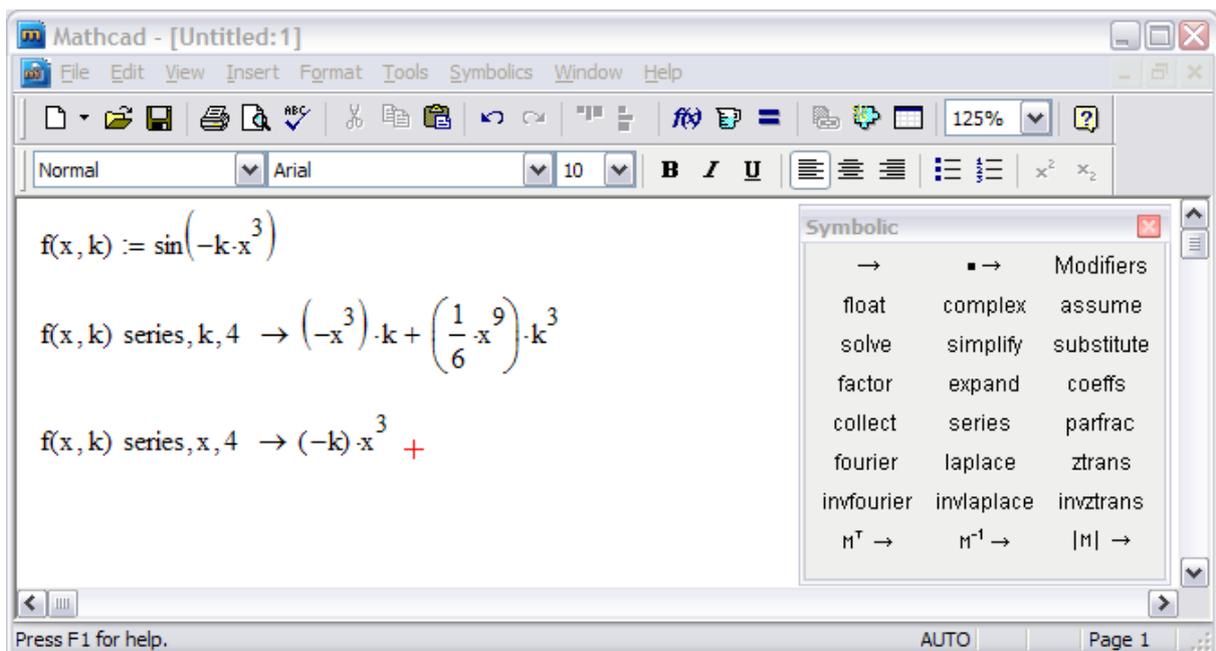


Рис. 4.19. Разложение в ряды

Для разложения в ряд альтернативным способом (с помощью оператора символьного вывода) используется ключевое слово *series*, вставляя его одноименной кнопкой панели Symbolic. После ключевого слова *series* через запятую указывается имя переменной, по которой производится разложение, и порядок аппроксимации (рис. 4.19).

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений

На примере расчета давлений при штамповке низких поковок сложной конфигурации покажем методику решения дифференциальных уравнений [38].

Штамповка низких поковок типа турбинных лопаток на кривошипных горячештамповочных прессах выявила ряд причин, препятствующих успешной эксплуатации этих машин и реализации предусмотренной технологии. К основным причинам, вызывающим простой оборудования, могут быть отнесены поломки отдельных деталей и заклинивания прессов при превышении номинальных усилий прессы, а также низкая стойкость штампов.

При определении усилия штамповки поковок с переменным по длине сечением определение удельного усилия только в одном сечении недостаточно, поскольку оно различно для каждого из них. Поэтому такое распределение должно быть построено для нескольких поперечных сечений поковки, число которых зависит от характера изменения конфигурации поковок.

Например, дана поковка конфигурации, представленной на рис. 4.20.

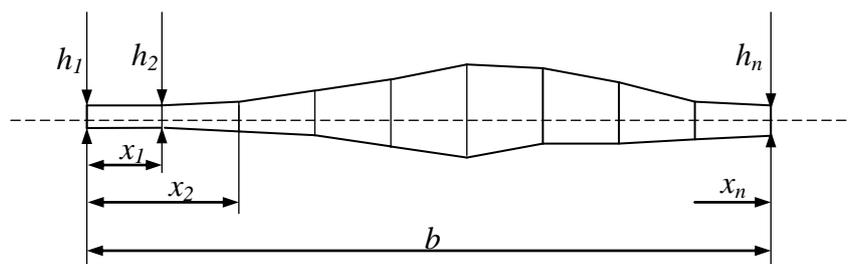


Рис. 4.20. Конфигурация поковки

Уравнение для расчета давления запишем в следующем виде:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu\sigma_s}{h}, \quad (4.1)$$

где p – давление; μ – коэффициент трения по Зибелю; σ_s – сопротивление деформации металла, МПа; h – высота поковки.

По формуле (4.1) можно определить значения давления по ширине рассматриваемого сечения поковки. Неизвестность положения «нейтрального сечения» приводит к необходимости расчета и построения эпюр удельных усилий для металла в облойной канавке и тем самым дает возможность определить максимальное давление.

Нахождение максимального давления с использованием MathCAD начинают с ввода массива h высот поковки по ширине (рис. 4.21). В данном случае задают 10 значений высот поковки. Ширина поковки $b = 90$ мм.

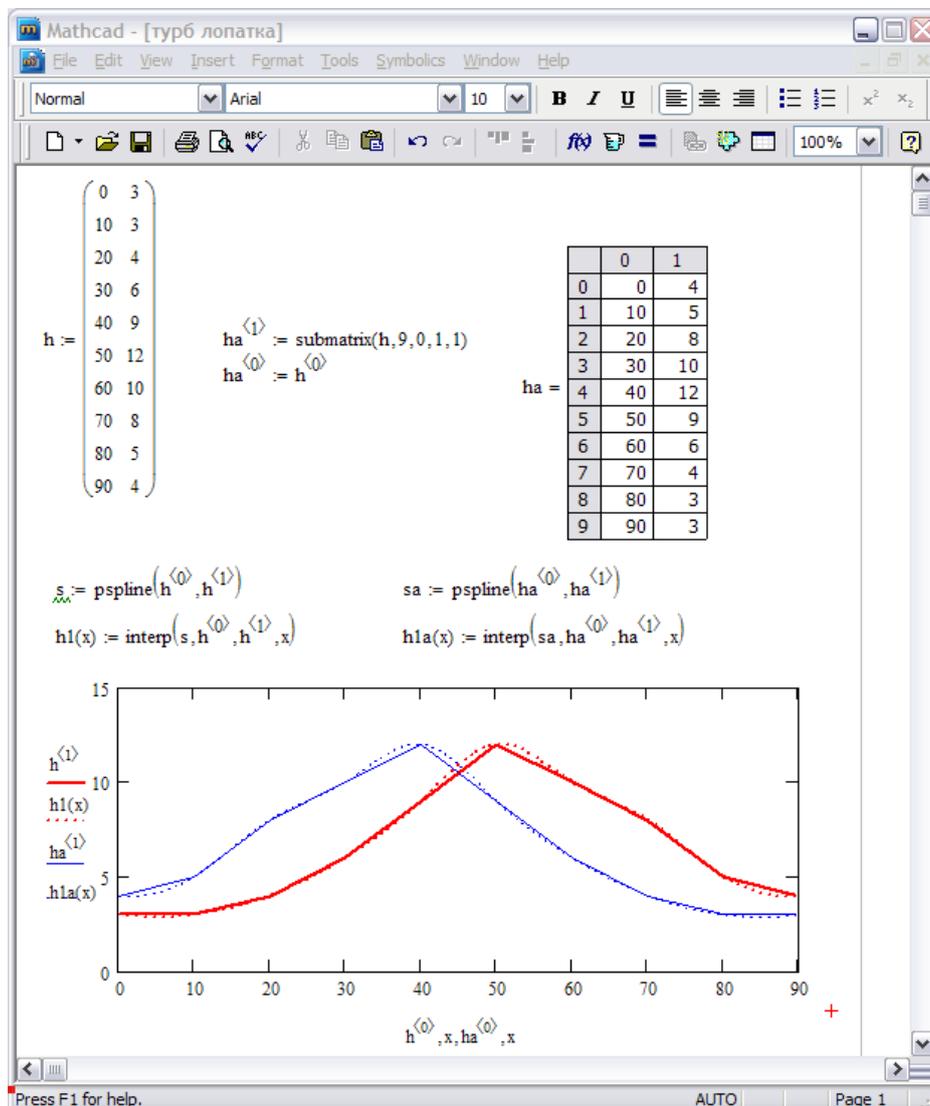


Рис. 4.21. Ввод массива с данными конфигурации поковки

Массив h состоит из двух столбцов: первый столбец значения x , второй – значения высот поковки h . Так как в MathCAD большинство

встроенных функций может выполняться при определении возрастающих переменных, а в данном случае нужно вести расчеты с обоих концов заготовки, то необходимо задать массив h_a с использованием встроенной функции *submatrix*, как показано на рис. 4.21. В массиве h_a первый столбец – возрастающие значения x , а второй – значения высот поковки в обратном порядке.

Для дальнейшего расчета необходимо высоты поковок представить в виде функции h_1 , полученной интерполяцией сплайнами с использованием полинома третьей степени. Для этого в MathCAD используется функция *interp* ($s, h^{<0>}, h^{<1>}, x$), которая возвращает интерполируемое значение, где вектор s вычисляется с использованием функции *cspline* ($h^{<0>}, h^{<1>}$), генерирующей сплайн – с использованием полинома третьей степени.

Те же действия проводятся для массива h_a с получением функции h_{1a} . Графическое отображение исходных значений h , h_a и полученной функции h_1 и h_{1a} представлено на рис. 4.21.

Рассчитывают σ_s по следующей формуле:

$$\sigma_s = A \cdot \xi_i^B, \quad (4.2)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты; ξ_i – скорость деформации, $\xi_i = 1,15 (V_{inst}/h_i)$; c^{-1} , V_{inst} – скорость движения инструмента.

Примем $A = 0,25$, $B = 0,1$, $V_{inst} = 0,25 \text{ c}^{-1}$.

В MathCAD задают указанные выше исходные данные, определяют ξ и ξ_a , далее σ_s и σ_{sa} , строят график изменения σ_s и σ_{sa} по ширине поковки (рис. 4.22).

Уравнение (4.1) в среде MathCAD задают так, как показано на рис. 4.22, при этом значение коэффициента трения μ принимают равным 0,3. Определяют граничные условия $x_0 = 0$ мм, $x_1 = 90$ мм, $p_0 = \sigma_{s0}$. Далее задают функцию $D(x,p) = f(x, p_0)$, возвращающую значения в виде вектора из n элементов, содержащих первые производные неизвестных функций. Задают количество точек $N = 1\,000$, в которых ищут решение. Далее определяют функцию $pr = rkfixed(p, x_0, x_1, N, D)$, возвращающую матрицу решений уравнения. Аналогичные действия проводят для поиска решения с правой стороны поковки, определяя функцию $pra = rkfixed(p_a, x_{a0}, x_{a1}, N, Da)$. Преобразуют полученный массив pr_a в pr_1 так, как показано на рис. 4.22. Строят график зависимости давлений $pr^{<1>}$, $pr_1^{<1>}$ от ширины поковки $pr^{<0>}$, $pr_1^{<0>}$. Точка пересечения двух линий будет являться максимальным давлением и положением нейтрального сечения.

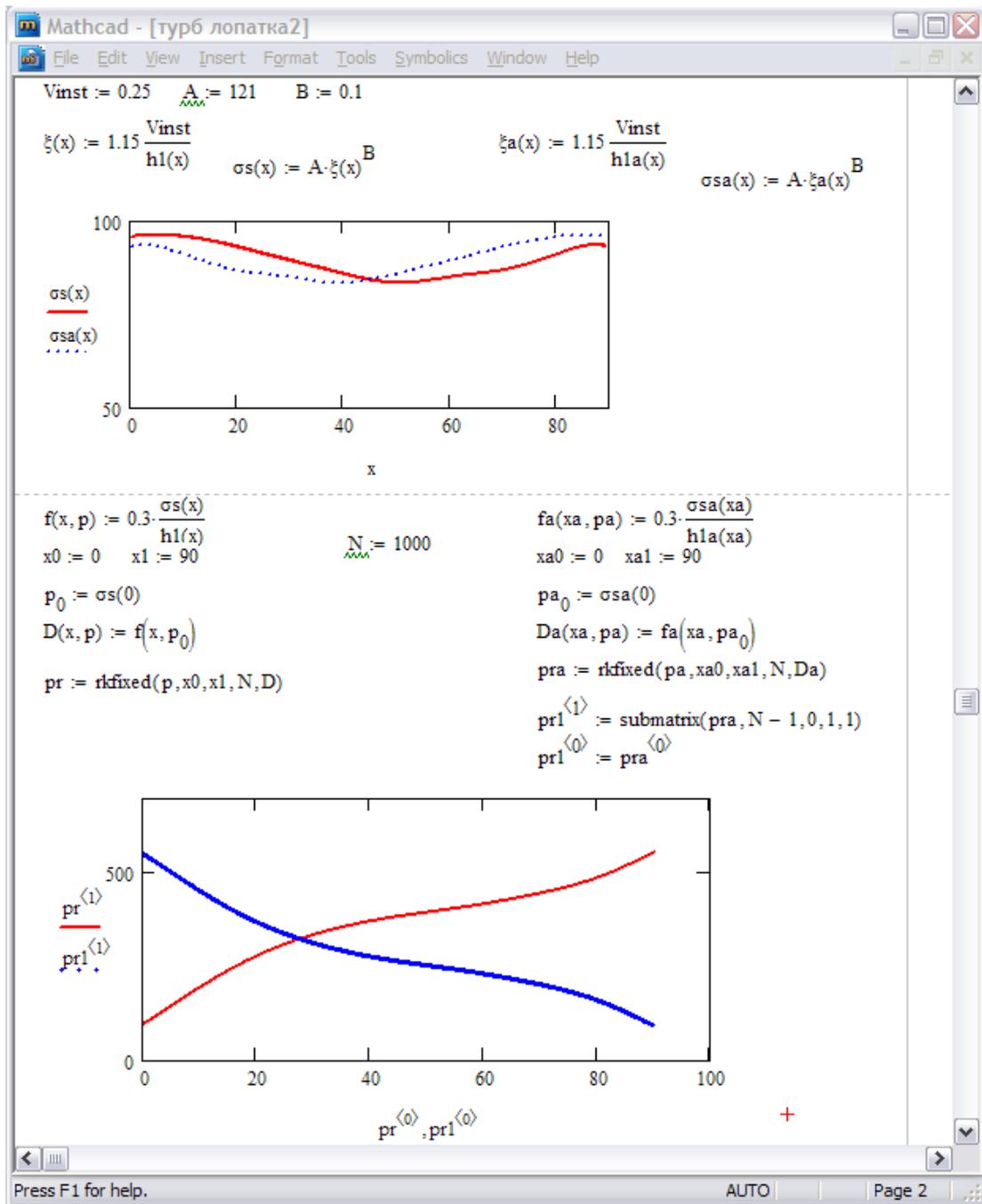


Рис. 4.22. Результат поиска максимального давления и положения нейтрального сечения

Решение дифференциальных уравнений в частных производных

Постановка задач для уравнений в частных производных включает определение самого уравнения (или системы нескольких уравнений), а также необходимого количества краевых условий (число и характер задания которых определяются спецификой уравнения).

По своему названию уравнения должны содержать частные производные неизвестной функции u (или нескольких функций, если уравнений несколько) по различным аргументам, например, пространственной переменной x и времени t . Соответственно, для решения задачи требуется вычислить функцию нескольких переменных, например, $u(x, t)$ в некоторой области определения аргументов $0 < x < L$ и $0 < t < T$.

Граничные условия определяются как заданные временные зависимости этих функций или производных этих функций на границах расчетной области 0 и L , а начальные – как заданная $u(x, 0)$.

Сами уравнения в частных производных (несколько условно) можно разделить на три основных типа:

1) параболические, содержащие первую производную по одной переменной и вторую – по другой, причем все эти производные входят в уравнение с одинаковым знаком;

2) гиперболические, содержащие первую производную по одной переменной и вторую – по другой, входящие в уравнение с разными знаками;

3) эллиптические, содержащие только вторые производные, причем одного знака.

Некоторые более сложные уравнения нельзя однозначно подогнать под приведенную классификацию, тогда говорят о гибридных типах уравнений.

Рассмотрим возможности MathCAD по решению уравнений в частных производных на примере одномерного динамического уравнение диффузии тепла

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \varphi(x,t,u). \quad (4.3)$$

Физическая модель на примере удлиненного тела типа металлического стержня представлена на рис. 4.23.

Если присмотреться к уравнению диффузии тепла внимательнее, то можно условно разделить практические случаи его использования на два типа:

1) *линейная задача* – если коэффициент диффузии D не зависит от температуры и u , кроме того, если источник тепла φ либо также не зависит от u , либо зависит от u линейно. В этом случае неизвестная функция $u(x, t)$ и все ее производные входят в уравнение только в первой степени (линейно);

2) *нелинейная задача* – если уравнение имеет нелинейную зависимость от $u(x, t)$, т. е. или коэффициент диффузии зависит от u , и (или) источник тепла нелинейно зависит от u .

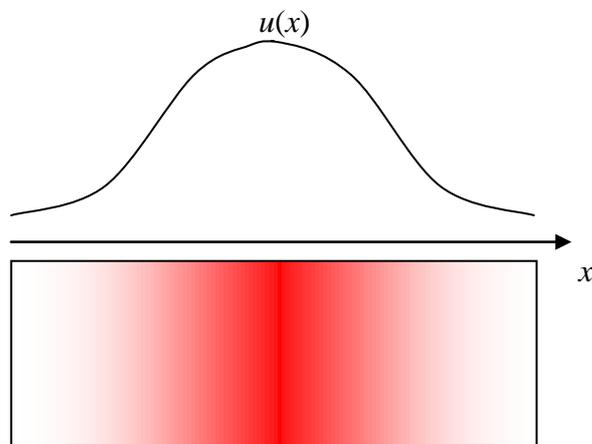


Рис. 4.23. Физическая модель одномерного уравнения теплопроводности

Решения линейных уравнений в частных производных, как правило, получаются вполне предсказуемыми, и их часто можно получить аналитически. В случае уравнения теплопроводности линейная задача описывает физически ожидаемое решение, выражающее остывание стержня в форме перетекания тепла от нагретого центра к холодной периферии. Нелинейные уравнения, напротив, могут демонстрировать самые неожиданные решения, причем в подавляющем большинстве практических задач их можно получить только численно, а никак не аналитически.

Запишем для одномерного уравнения теплопроводности (4.3) начальные условия:

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad (4.4)$$

граничные условия:

$$u(0, t) = f_0(t), u(L, t) = f_1(t), \quad (4.5)$$

которые необходимы для правильной с математической точки зрения постановки задачи.

Основным отличием решения дифференциальных уравнений в частных производных от обыкновенных дифференциальных уравнений является необходимость дискретизации уравнения не по одной, а по нескольким переменным (в зависимости от размерности задачи).

Таким образом, сначала следует покрыть расчетную область (x, t) сеткой и использовать затем узлы этой сетки для разностной аппроксимации уравнения. В результате вместо поиска непрерывных зависимостей $u(x, t)$ достаточно будет отыскивать значения функции в узлах сетки (а ее поведение в промежутках между узлами может быть получено при помощи построения какой-либо интерполяции). По этой причине дискретное представление функции u часто называют сеточной функцией.

Поскольку уравнения в частных производных по определению зависят от производных неизвестных функций по нескольким переменным, то способов дискретизации этих уравнений может быть несколько. Конфигурацию узлов, используемую для разностной записи уравнений в частных производных на сетке, называют шаблоном, а полученную систему разностных уравнений – разностной схемой. О принципах построения разностных схем и, в частности, о классах явных и неявных схем подробно описано в работе [33], поэтому перейдем к рассмотрению типичных особенностей уравнений в частных производных, которые возникают при разработке и реализации разностных схем.

Для построения разностной схемы используем шаблон, изображенный на рис. 4.24.

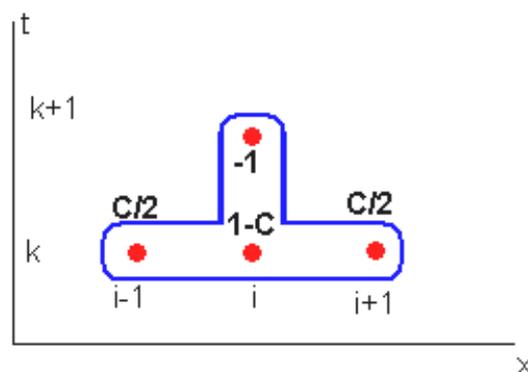


Рис. 4.24. Шаблон аппроксимации явной схемы для уравнения теплопроводности

Для дискретизации второй производной по пространственной координате необходимо использовать три последовательных узла, в то время как для разностной записи первой производной по времени достаточно двух узлов. Записывая на основании данного шаблона дискретное представление для (i, k) -го узла, получим разностное уравнение

$$\frac{u_{i,k+1} - u_{i,k}}{\Delta} = D \cdot \frac{u_{i-1,k} - 2u_{i,k} + u_{i+1,k}}{\Delta_x^2} + \phi_{i,k}. \quad (4.6)$$

Приведем в разностной схеме (4.6) подобные слагаемые, перенеся в правую часть значения сеточной функции с индексом k (как часто говорят, с предыдущего слоя по времени), а в левую – с индексом $k+i$ (т. е. со следующего временного слоя). Кроме того, введем коэффициент c (коэффициент Куранта), который будет характеризовать отношение шагов разностной схемы по времени и пространству

$$c_{i,k} = \frac{2\Delta_t D_{i,k}}{(\Delta_x)^2}.$$

С учетом этих замечаний, разностная схема (4.6) запишется в виде

$$u_{i,k} = \frac{c_{i,k}}{2} \cdot u_{i-1,k} + (1 - c_{i,k}) \cdot u_{i,k} + \frac{c_{i,k}}{2} \cdot u_{i+1,k} + \phi_{i,k}. \quad (4.7)$$

Множители для каждого из значений сеточной функции в узлах шаблона, соответствующие разностному уравнению (4.7), приведены рядом с каждой точкой шаблона на рис. 4.24. Фактически геометрия шаблона и эти множители задают построенную нами разностную схему.

Несложно убедиться в том, что для получения замкнутой системы разностных алгебраических уравнений систему (4.7) необходимо дополнить дискретным представлением начального и граничных условий (4.4) и (4.5). Тогда число неизвестных будет в точности равно числу уравнений, а процесс формирования разностной схемы будет окончательно завершён.

Можно предложить несложный алгоритм реализации этой разностной схемы. Действительно, каждое неизвестное значение сеточной функции со следующего временного слоя, т. е. левая часть соотношения (4.7), явно выражается через три ее значения с предыдущего слоя (правая часть), которые уже известны. Для расчета первого слоя по времени нужно подставить в (4.7) начальное условие (известные значения u с нулевого слоя в узлах сетки), для расчета второго слоя достаточно использовать вычисленный таким образом набор u с первого слоя и т. д. Из-за того, что разностная схема сводится к такой явной подстановке, ее и называют явной, а благодаря пересчету значений с текущего слоя через ранее вычисленные слои – схемой бегущего счета.

Рассмотрим реализацию в MathCAD линейного уравнения.

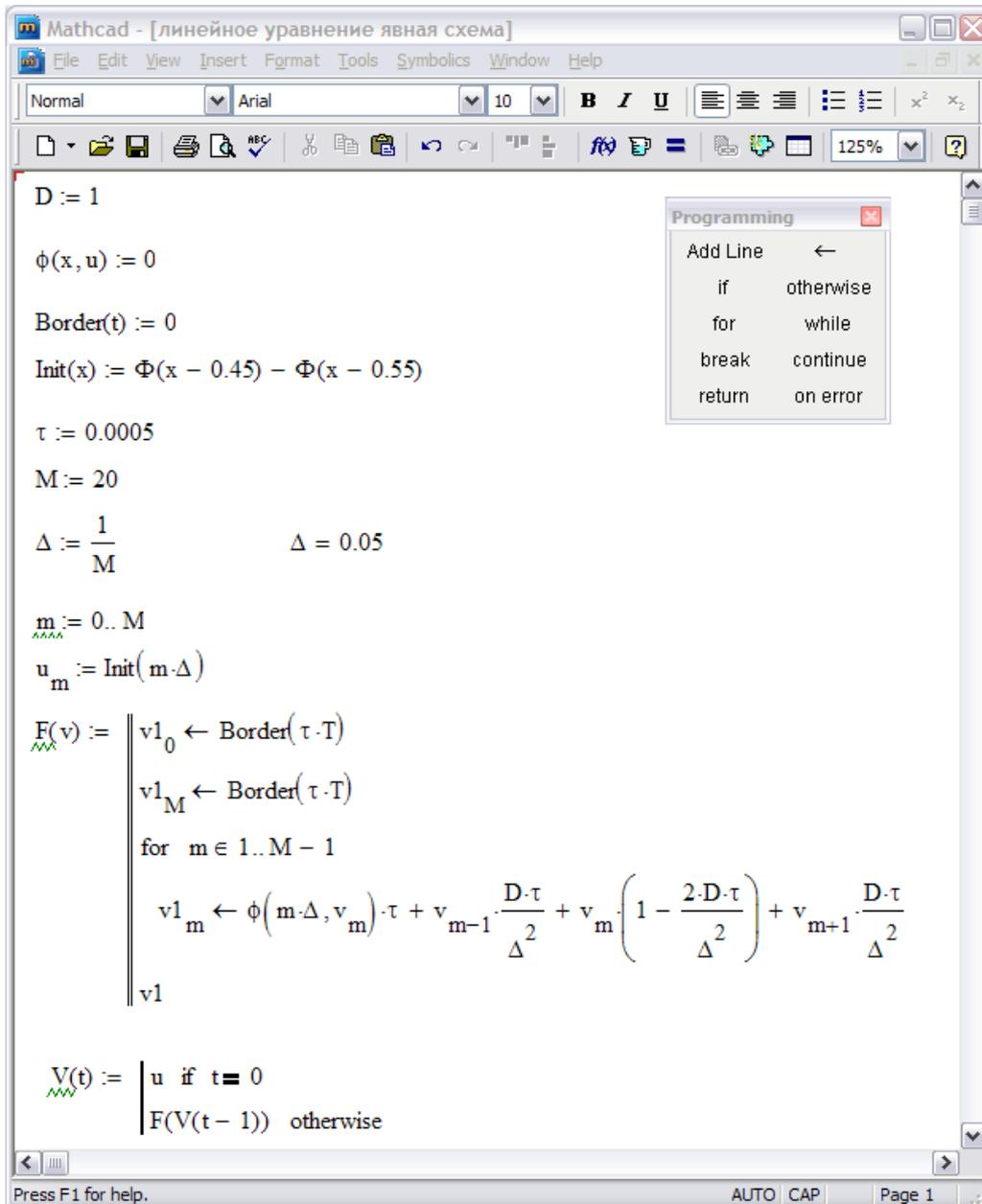


Рис. 4.25. Ввод решения явной схемы для линейного уравнения теплопроводности

Решение системы разностных уравнений (4.7) для модели без источников тепла, т. е. $\phi(x, T, t) = 0$ и постоянного коэффициента диффузии $D = \text{const}$, приведено на рис. 4. 25. В первых трех строках заданы шаги по временной и пространственной переменным t и Δ , а также коэффициент диффузии D , равный единице. В следующих двух строках заданы начальные (нагретый центр области) и граничные (постоянная температура на краях) условия соответственно. Затем приво-

дится возможное программное решение разностной схемы, причем функция пользователя $V(t)$ задает вектор распределения искомой температуры t в каждый момент времени (на каждом слое).

Программный модуль в MathCAD обозначается вертикальной чертой. Для начала ввода программного модуля для функций пользователя $F(v)$ и $V(t)$ необходимо использовать кнопку Add Line на панели Programming. Нужное количество строк модуля задается повторными нажатиями кнопки Add Line. Операторы программирования for, if, otherwise и стрелка, направленная справа налево, вводятся при помощи одноименных кнопок с той же панели Programming.

Начальное распределение температуры вдоль расчетной области и решение для двух моментов времени (3 и 10 с) показано на рис. 4.26. Физически такое поведение вполне естественно – с течением времени тепло из более нагретой области перетекает в менее нагретую, а зона изначально высокой температуры остывает и размывается.

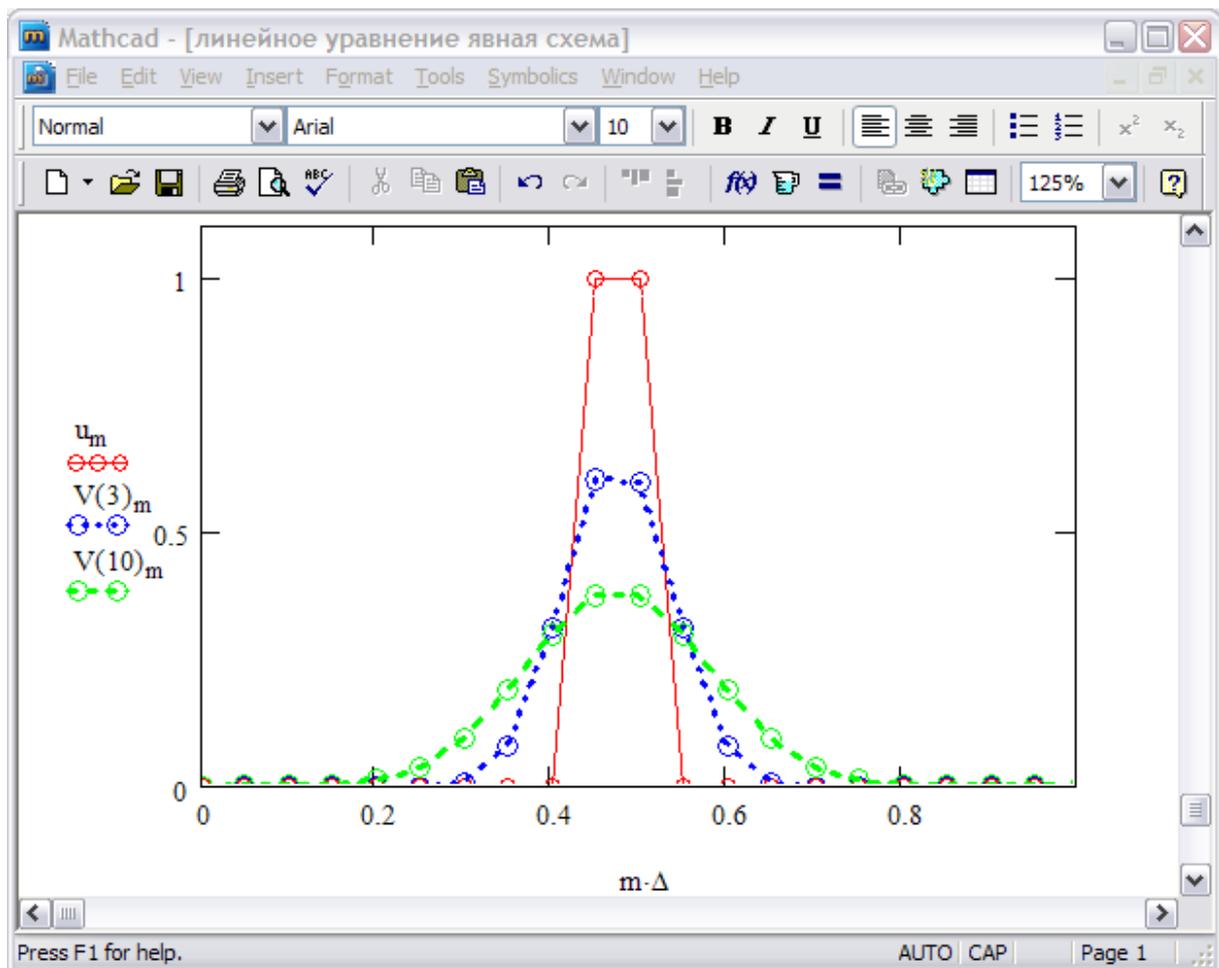


Рис. 4.26. Визуализация решения линейного уравнения теплопроводности

Для нелинейного уравнения теплопроводности можно получить решение с нелинейным источником тепла $\phi(u)=10^3(u-u^3)$. Заметим, что необходимо предварительно определить коэффициент диффузии и источник тепла в виде пользовательских функций, зависящих от аргумента u , т. е. от температуры. Моделируя зависимость их от координат, необходимо было бы ввести в пользовательскую функцию в качестве аргумента переменную x , как это сделано для источника тепла ϕ . Поэтому заменим константы $D(u) = 1$ и $\phi(x,u) = 0$ на новые функции, которые станут описывать другие модели диффузии тепла. Введем $\phi(x, u):=10^3(u-u^3)$, не изменяя постоянного значения коэффициента диффузии.

Зависимость коэффициента диффузии и функции источника тепла от температуры означает, что эти параметры будут меняться от точки к точке среды, определяясь локальными значениями текущей температуры в них. Ввод ненулевого источника тепла означает, что среда получает определенное количество тепла тем большее, чем больше локальная температура. Можно догадаться, что введение такой зависимости может моделировать, в частности, горение среды.

Если осуществить расчеты с упомянутым источником (имеющим кубическую нелинейность), то получится очень интересное решение уравнения теплопроводности, имеющее профиль тепловых фронтов. С течением времени граница раздела высокой и низкой температуры распространяется в обе стороны от зоны первичного нагрева, оставаясь весьма четко выделенной (рис. 4.27).

Как видно из ранее описанного, с уравнениями в частных производных вполне можно справиться и не прибегая к специфическим средствам MathCAD. Между тем в MathCAD имеется несколько встроенных функций, при помощи которых можно автоматизировать процесс решения дифференциальных уравнений в частных производных.

Разработчики впервые применили дополнительные встроенные функции для решения параболических и гиперболических уравнений в частных производных в версии MathCAD 11, отлично осознавая значимость этих задач для современного исследователя и инженера. Предусмотрены два варианта решения: при помощи вычислительного блока Given/pdesolve, а также при помощи встроенной функции num01. Первый путь проще в применении и нагляднее, зато второй позволяет автоматизировать процесс решения уравнений в частных производных, например, если нужно включить его в качестве составного шага в более сложную MathCAD-программу.

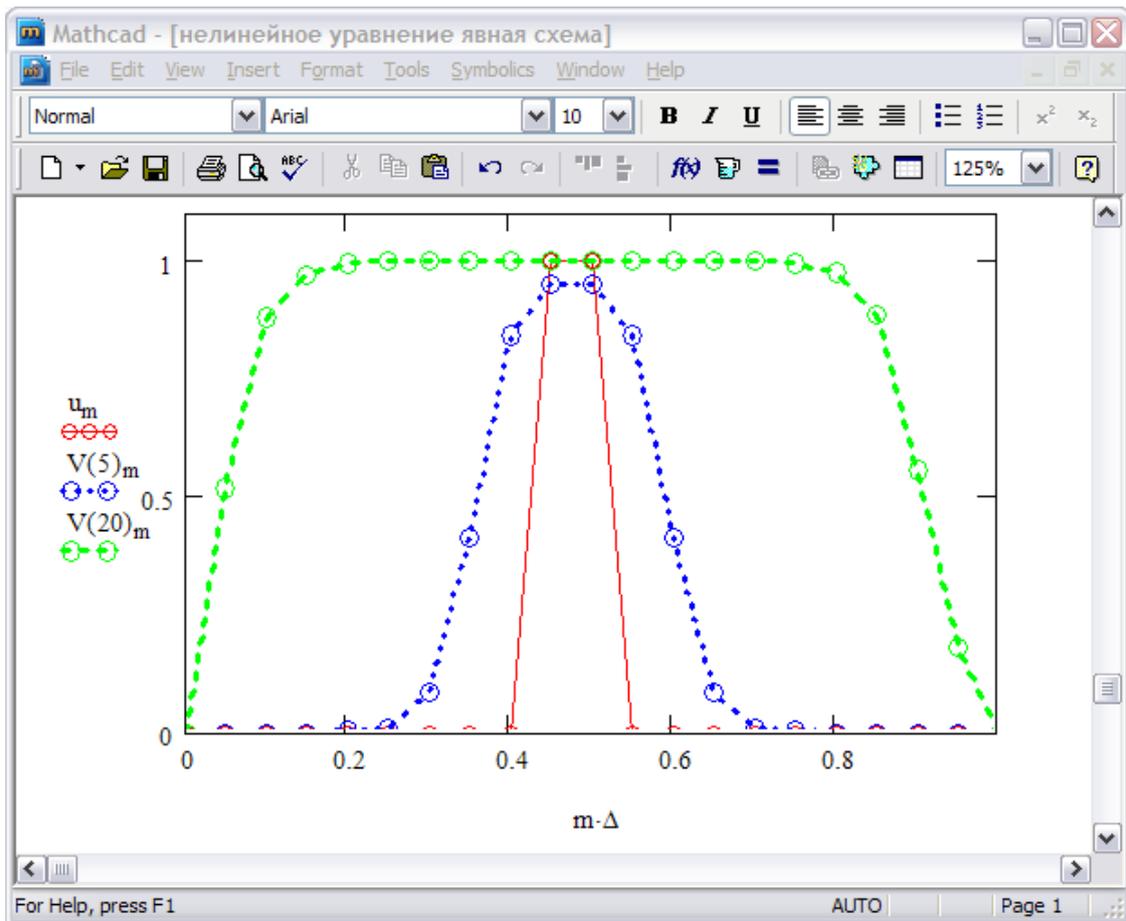


Рис. 4.27. Решение уравнения теплопроводности с нелинейным источником (тепловой фронт)

Встроенная функция `pdsolve` применяется в рамках вычислительного блока, начинающегося ключевым словом *Given* и пригодна для решения различных гиперболических и параболических уравнений. Она предназначена для решения одномерного уравнения (или системы уравнений) в частных производных (того, которое определит пользователь в рамках вычислительного блока *Given*), зависящего от времени t и пространственной координаты x , имеет целый набор различных аргументов.

Функция `pdsolve` ($u, x, \text{xrange}, t, \text{trange}, [\text{xpts}], [\text{tpts}]$) возвращает скалярную (для единственного исходного уравнения) или векторную (для системы уравнений) функцию двух аргументов (x, t), являющуюся решением дифференциального уравнения (или системы уравнений) в частных производных. Результирующая функция получается интерполяцией сеточной функции, вычисляемой согласно разностной схеме:

u – явно заданный вектор имен функций (без указания имен аргументов), подлежащих вычислению. Эти функции, а также граничные условия (в форме Дирихле или Неймана) должны быть определе-

ны пользователем перед применением функции `pdesolve` в вычислительном блоке после ключевого слова *Given*. Если решается не система уравнений в частных производных, а единственное уравнение, то соответственно вектор x должен содержать только одно имя функции и вырождается в скаляр;

x – пространственная координата (имя аргумента неизвестной функции);

`xrange` – пространственный интервал, т. е. вектор значений аргумента x для граничных условий. Этот вектор должен состоять из двух действительных чисел (представляющих левую и правую границу расчетного интервала);

t – время (имя аргумента неизвестной функции);

`trange` – расчетная временная область: вектор значений аргумента t , который должен состоять из двух действительных чисел (представляющих левую и правую границу расчетного интервала по времени);

`xpts` – количество пространственных точек дискретизации (может не указываться явно, в таком случае будет подобрано программой автоматически);

`tpts` – количество временных слоев, т. е. интервалов дискретизации по времени (также может не указываться пользователем явно).

В качестве примера применения функции `pdesolve` (рис. 4.28) используют то же самое одномерное уравнение теплопроводности (4.3) с граничными и начальными условиями.

Для корректного использования функции `pdesolve` предварительно (после ключевого слова *Given*) следует записать само уравнение и граничные условия при помощи логических операторов (панель `Boolean`). При этом уравнение должно содержать имя неизвестной функции $u(x,t)$ вместе с именами аргументов (а не так, как она записывается в пределах встроенной функции `pdesolve`). Для идентификации частных производных в пределах вычислительного блока следует использовать нижние индексы, например $u_x(x,t)$, для обозначения второй производной функции u по пространственной координате x .

Как видно из рис. 4.28, на котором изображены результаты расчетов, встроенная функция с успехом справляется с уравнением диффузии, отыскивая уже хорошо знакомое нам решение. Заметим, что использование встроенной функции `pdesolve` связано с довольно громоздкими вычислениями, которые могут отнимать существенное время.

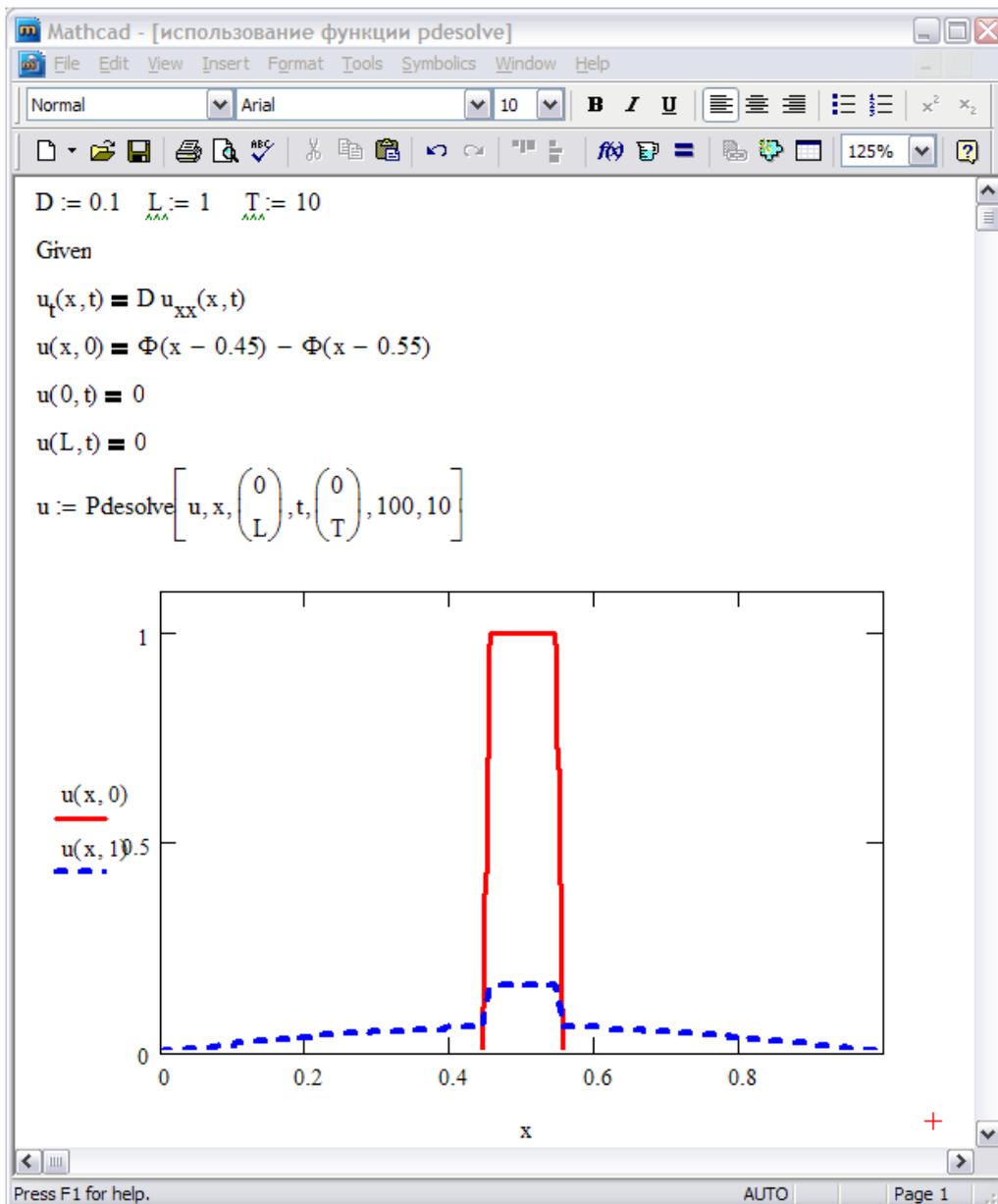


Рис. 4.28. Решение уравнения диффузии тепла при помощи встроенной функции pdesolve

4.3. Реализация в среде MathCAD моделей на основе интегральных уравнений энергетического баланса

Интегрирование в среде MathCAD

Интегрирование, как и дифференцирование, и множество других математических действий, устроено в MathCAD по принципу «как пишется, так и вводится». Чтобы вычислить определенный интеграл,

следует напечатать его обычную математическую форму в документе. Делается это с помощью панели Calculus (Вычисления) нажатием кнопки со значком интеграла. Появится символ интеграла с несколькими местозаполнителями (рис. 4.29), в которые нужно ввести нижний и верхний интервалы интегрирования, подынтегральную функцию и переменную интегрирования.

Чтобы получить результат интегрирования, вводят знак равенства или символьного равенства. В первом случае интегрирование будет проведено численным методом, во втором – в случае успеха, будет найдено точное значение интеграла с помощью символьного процессора MathCAD. Эти два способа показаны на рис. 4.29. Конечно, символьное интегрирование возможно только для сравнительно небольшого круга несложных подынтегральных функций.

MathCAD позволяет вычислять интегралы с одним или обоими бесконечными пределами (рис. 4.29). Для этого на месте соответствующего предела вводят символ бесконечности, используя, например, ту же самую панель Calculus.

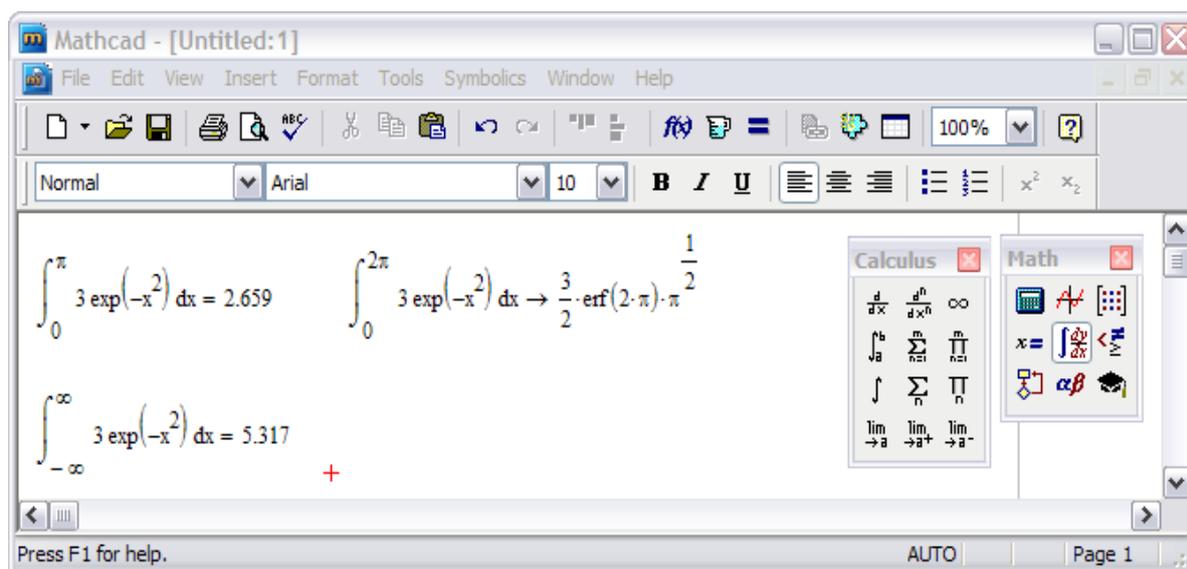


Рис. 4.29. Интегрирование в среде MathCAD

Подынтегральная функция может зависеть от любого количества переменных. Именно для того, чтобы указать, по какой переменной MathCAD вычисляют интеграл, нужно вводить ее имя в соответствующий местозаполнитель. Нужно помнить, что для численного интегрирования по одной из переменных предварительно следует задать значение остальных переменных, от которых зависит подынтегральная функция и для которых вычисляют интеграл.

Результат численного интегрирования – это не точное, а приближенное значение интеграла, определенное с погрешностью, которая зависит от встроенной константы TOL. Чем она меньше, тем с большей точностью будет найден интеграл, но и тем больше времени будет затрачено на расчеты. По умолчанию $TOL = 0,001$. Для того чтобы ускорить вычисления, можно установить большее значение TOL.

Если скорость расчетов имеет принципиальное значение, например при многократном вычислении интеграла внутри цикла, нужно осторожно выбрать значение точности. Следует обязательно поэкспериментировать на тестовом примере с характерной для расчетов подынтегральной функцией. А затем посмотреть, как уменьшение константы TOL сказывается на погрешности интегрирования, вычисляя интеграл для разных ее значений и выбирая оптимальное, исходя из соотношения точность/скорость вычислений.

В расчетах пользователь имеет возможность выбирать сам алгоритм численного интегрирования.

Для этого:

1) щелкнуть правой кнопкой мыши в любом месте на левой части вычисляемого интеграла;

2) в появившемся контекстном меню выбрать один из имеющихся в наличии численных алгоритмов, например Romberg (Ромберга).

Перед тем, как один из алгоритмов выбран впервые, флажок проверки в контекстном меню должен быть установлен возле пункта AutoSelect (Автоматический выбор). Это означает, что алгоритм определяется MathCAD, исходя из анализа пределов интегрирования и особенностей подынтегральной функции. Как только один из алгоритмов выбран, этот флажок сбрасывается, а избранный алгоритм отмечается точкой.

В MathCAD запрограммированы четыре численных метода интегрирования.

1. Romberg (Ромберга) – для большинства функций, не содержащих особенностей.

2. Adaptive (Адаптивный) – для функций, быстро меняющихся на интервале интегрирования.

3. Infinite Limit (Бесконечный предел) – для интегралов с бесконечными пределами.

4. Singular Endpoint (Сингулярная граница) – для интегралов с сингулярностью на конце (применяется модифицированный алгоритм Ромберга для функций, не определенных на одном или обоих концах интервала интегрирования).

Также MathCAD позволяет работать со следующими интегралами и интегральными преобразованиями:

- неопределенные интегралы;
- расходящиеся;
- кратные;
- интегралы Фурье (преобразование Фурье);
- преобразование Лапласа;
- Z-преобразование;
- дискретные волновые преобразования.

Метод работ на примере задачи осадки полосы

Метод [39] основан на том положении, что при пластической деформации работа внешних сил равна сумме работ внутренних сопротивлений. При деформации нужно затратить энергию на преодоление внутренних сопротивлений, определяемых прочностными свойствами тела и сил внешнего трения. Работу деформации можно рассчитать по формуле

$$A_a - A_{mp} = A_\delta,$$

или

$$A_a = A_\delta + A_{mp}, \quad (4.8)$$

где A_a – работа активных сил; A_{mp} – работа сил трения; A_δ – работа внутренних сопротивлений, работа деформации.

Определим приращение работы внутренних сил A_δ при малой деформации. При пластической деформации начальные напряжения отличны от нуля и при незначительном изменении формы тела их можно принять постоянными. Поэтому приращение работы при пластической деформации можно записать так:

$$dA_\delta = (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) / dV.$$

Подставив в это выражение значения деформаций, получим

$$\begin{aligned} dA_\delta &= \left[\frac{\sigma_x (\sigma_x - \sigma_{cp})}{2G'} + \frac{\sigma_y (\sigma_y - \sigma_{cp})}{2G'} + \frac{\sigma_z (\sigma_z - \sigma_{cp})}{2G'} + \frac{1}{G'} \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] dV = \\ &= \frac{1}{G'} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] dV. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Выражение в квадратных скобках равно удвоенному квадрату интенсивностей напряжений σ_i^2 . Модуль пластичности второго рода G' выразим через модуль пластичности первого рода E' , а последний – через интенсивность напряжений и деформаций, тогда $G' = E'/3 = \sigma_i/3\varepsilon_i$.

Подставив в выражение (4,9) вместо квадратных скобок $2\sigma_i^2$ и значение G' , получим:

$$dA_d = \sigma_i \varepsilon_i dV.$$

Отсюда

$$A_d = \iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV. \quad (4.10)$$

Работу внешних (поверхностных) сил, включая работу контактных сил трения, можно выразить так:

$$\iint_F (Xu + Yv + Zw) dF,$$

где X, Y, Z – проекции сил на оси координат; u, v, w – соответствующие координатам перемещения.

Работу сил контактного трения в общем случае можно представить так:

$$A_{mp} = -\tau_\kappa \iint_F \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} dF, \quad (4.11)$$

где τ_κ – напряжение трения (вынесено за интеграл, так как принято постоянным и изотропным).

Подставив выражение (4.10) и (4.11) в уравнение (4.8) и принимая абсолютное значение A_{mp} , получим:

$$A_a = \iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV + \tau_\kappa \iint_F \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} dF.$$

Во многих случаях работу активных сил трения можно определить как произведение полного усилия на перемещение инструмента (обжатие), т. е. $A_a = P\Delta h$.

Тогда полное усилие

$$P = \frac{1}{\Delta h} \left[\iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV + \tau_\kappa \iint_F \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} dF \right]. \quad (4.12)$$

Применим метод работ к определению усилия осадки полосы шириной $2b$, высотой $2h$ и длиной l , значительно превышающей ширину, так, что деформацию можно рассматривать плоской (рис. 4.30). Напряжения трения τ_k на контактной поверхности принимаем постоянным, не зависящим от x . Деформацию принимаем равномерной, хотя трение на контактной поверхности в действительности приводит к неравномерности деформации. Напряжения σ_z и σ_x в этом случае являются главными и $\sigma_i = \sigma_m$.

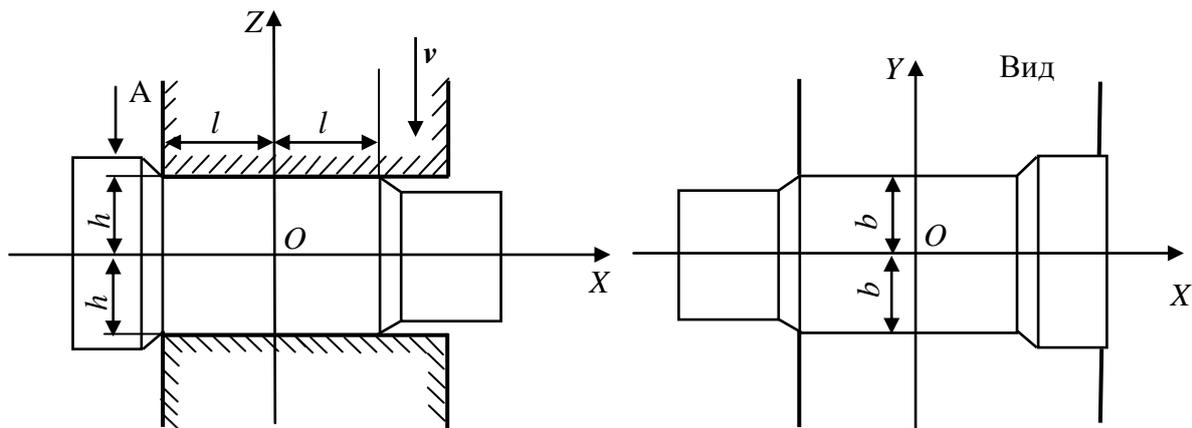


Рис. 4.30. Схема осадки полосы плоскими бойками

Относительная деформация по оси z при малой осадке равна относительному обжатию, взятому со знаком «минус», т. е.

$$\varepsilon_z = \varepsilon_3 = -\Delta h / 2h; \varepsilon_y = \varepsilon_2 = 0; \varepsilon_x = \varepsilon_1 = \Delta h / 2h.$$

Тогда интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1^2 + 4\varepsilon_1^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}h}.$$

Абсолютная работа внутренних сил, согласно выражению (4.8), с учётом постоянства размера l при интегрировании в пределах одной четверти сечения полосы определяется уравнением

$$A_o = 4\sigma_m \frac{\Delta h}{\sqrt{3}h} l \int_0^b \int_0^h dx dz = 2\sigma_m^* b \Delta h l. \quad (4.13)$$

Решение двойного интеграла в уравнении (4.13) произведем в среде MathCAD, как показано на рис. 4.31.

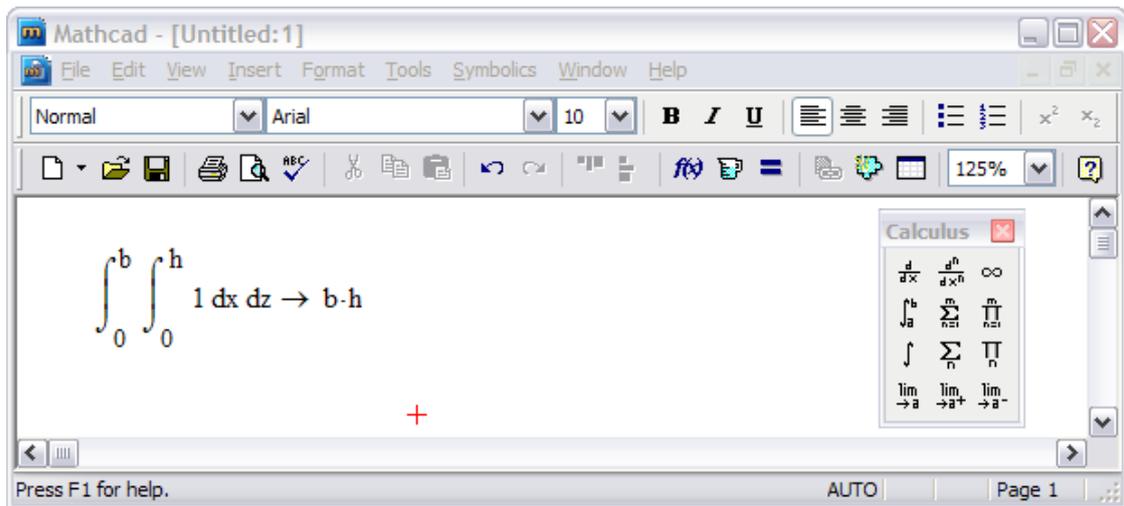


Рис. 4.31. Решение двойного интеграла

Работу сил трения, учитывая, что в условиях плоской деформации смещение по контактной поверхности происходит только по оси x и по двум контактными поверхностям, определим согласно выражению (4.11)

$$A_{mp} = -4\tau_{\kappa} l \int_0^b u dx. \quad (4.14)$$

Находим перемещение u по формуле

$$u = \varepsilon_x x + C.$$

Постоянную интегрирования (она не зависит от z) определяем при $x = 0$ и $u = 0$: $C = 0$.

Подставив значение u в предыдущее уравнение, получаем (рис. 4.32)

$$A_{mp} = 4\tau_{\kappa} l \int_0^b \frac{\Delta h x}{2h} dx = \tau_{\kappa} l \frac{\Delta h}{h} b^2. \quad (4.15)$$

Подставив значение A_{δ} из выражения (4.13) и A_{mp} из выражения (4.15) в уравнение (4.12), находим

$$P = 2\sigma_m^* l b + \frac{\tau_{\kappa} l b^2}{h}.$$

Разделив это уравнение на контактную площадь $2bl$, получаем удельное давление

$$p = \sigma_m^* + \frac{\tau_{\kappa} b}{2h}.$$

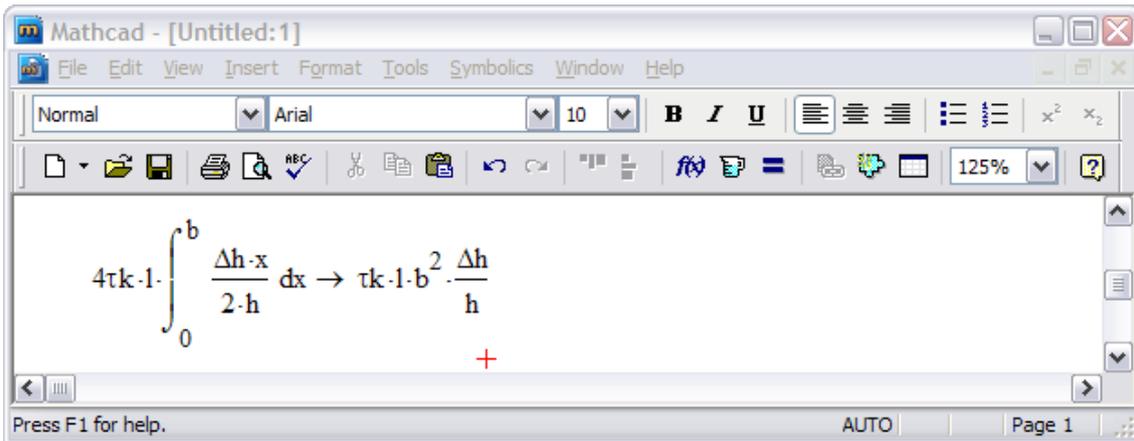


Рис. 4.32. Решение в MathCAD уравнения (4.15)

Принимаем допущение, что контактное касательное напряжение постоянно; согласно Зибелю, оно пропорционально σ_m^* , т. е.

$$\tau_k = -f\sigma_m^*.$$

Подставив абсолютное значение τ_k в предыдущее уравнение, получаем

$$p = \sigma_m^* \left(1 + \frac{fb}{2h} \right). \quad (4.16)$$

Вариационные методы на примере задачи осадки полосы

Рассмотрим применение вариационных методов [39] к решению задачи осадки полосы шириной $2b$, толщиной $2h$ и длиной l между шероховатыми плитами в условиях плоской деформации.

Вследствие симметрии рассмотрим четверть сечения полосы, поместив начало координат на середине высоты полосы. Работа внешних сил равна работе активных сил и сил трения на контактной поверхности, являющихся силами сопротивления. Работа активных сил равна произведению полного усилия на вертикальное перемещение w при $z = h$, или, что то же самое, на абсолютное обжатие: $A_a = Pw_{z=h} = P\Delta h$. Работа сил трения на элементе поверхности контакта dF равна произведению перемещения вдоль контактной поверхности на напряжение трения.

Учитывая, что сила трения противоположна перемещению, можно работу сил трения выразить так:

$$A_{mp} = -\tau_k \iint_F \sqrt{u_{z=h}^2 + v_{z=h}^2} dF.$$

При плоской деформации перемещение v вдоль оси y равно нулю, поэтому

$$A_{mp} = -\tau_k \int_0^b u_{z=h} dx.$$

Выразим напряжения трения в долях k : $\tau_h = \alpha_k$.
Тогда

$$A_{mp} = -\alpha k \int_0^b u_{z=h} dx.$$

Работа внешних сил, принимая A_{mp} с плюсом,

$$A_B = A_a - A_{mp} = Pw_{z=h} - \alpha k \int_0^b u_{z=h} dx. \quad (4.17)$$

Работу внутренних сил в условиях плоской деформации можно выразить так:

$$A_\delta = k \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz. \quad (4.18)$$

Работа активных сил

$$A_a = P\Delta h = k \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz + ak \int_0^b u_{z=h} dx. \quad (4.19)$$

Работа внешних сил на возможных перемещениях равна работе сил трения на возможных перемещениях, т. е.

$$A_{mp} = \alpha k \delta \int_0^b u_{z=h} dx. \quad (4.20)$$

Работа внутренних сил на возможных перемещениях равна

$$A_\delta = k \delta \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz, \quad (4.21)$$

и, согласно началу возможных перемещений,

$$\alpha k \delta \int_0^b u_{z=h} dx + k \delta \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz = 0. \quad (4.22)$$

Если выразить u и Γ по Ритцу через подходящие функции, то уравнение (4.22) после сокращения на k примет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_1} \alpha \int_0^b u_{z=h} dx + \frac{\partial}{\partial a_1} \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz = 0, \\ \frac{\partial}{\partial a_2} \alpha \int_0^b u_{z=h} dx + \frac{\partial}{\partial a_2} \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz = 0, \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\}. \quad (4.23)$$

Выберем подходящие функции для перемещений u и w ; перемещение v при плоской деформации равно нулю.

При осадке с трением деформация является неравномерной. Горизонтальные сечения в результате деформации получают прогиб, имеющий максимальное значение у контактных поверхностей и затухающие по мере удаления от них. Примем, что горизонтальные сечения имеют параболическую форму. Вертикальные сечения также изгибаются, приближаясь по форме к параболе.

Тогда перемещение u по оси x можно представить, например, в такой форме:

$$u = a_1 x + a_2 x \left(1 - \frac{3z^2}{h^2} \right) \left(1 - \frac{x^2}{3b^2} \right). \quad (4.24)$$

Таким образом перемещение u выражено с помощью двух варьируемых параметров.

Определим составляющие деформации:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_1 + a_2 \left(1 - 3z^2 / h^2 \right) \left(1 - x^2 / b^2 \right); \\ \varepsilon_y = 0; \\ \varepsilon_z = -\varepsilon_x = - \left[a_1 + a_2 \left(1 - 3z^2 / h^2 \right) \left(1 - x^2 / b^2 \right) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (4.25)$$

Найдем вертикальное перемещение:

$$w = \int \varepsilon_z dz = - \left[a_1 z + a_2 z \left(1 - \frac{x^2}{b^2} \right) \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \right] + f(x). \quad (4.26)$$

Произвольную функцию $f(x)$ определяют из граничных условий (при $z = 0, w = 0$): $f(x) = 0$. Следовательно,

$$w = - \left[a_1 z + a_2 z \left(1 - \frac{x^2}{b^2} \right) \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \right]; \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = -6a_2 \frac{xz}{h^2} \left(1 - \frac{x^2}{3b^2} \right) + 2a_2 \frac{xz}{b^2} \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) = \\ &= \frac{2a_2 xz}{b^2 h^2} \left[(h^2 - z^2) - (3b^2 - x^2) \right]; \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{xy} = 0.$$

Из уравнения (4.27) можно сразу найти значение параметра a_1 : при $z = h$, т. е. на контактной поверхности: $w = -\Delta h/2$.

Отсюда $\Delta h/2 = a_1 h$ и

$$a_1 = \Delta h / 2h = \varepsilon, \quad (4.29)$$

т. е. a_1 равно относительному обжатия.

Для определения параметра a_2 нужно решить второе уравнение системы (4.23).

Далее вычисляют первое слагаемое этого уравнения, представляющее собой производную работы контактного трения по параметру a_2 , деленную на k . Вначале $u_{z=h}$ определяют из уравнения (4.24):

$$u_{z=h} = \varepsilon x - 2a_2 x + a_s \frac{2x^3}{3b^2}. \quad (4.30)$$

Подставив уравнение (4.30) в первое слагаемое второго уравнения (4.23) и находят решение интеграла в среде MathCAD (рис. 4.33):

$$\frac{\partial A_{mp}}{k \partial a_2} = \alpha \frac{\partial}{\partial a_2} \int_0^b u_{z=h} dx = \alpha \int_0^b \frac{\partial u_{z=h}}{\partial a_2} dx = \alpha \int_0^b \left(-2x + \frac{2x^3}{3b^2} \right) dx = -0,833 \alpha b^2. \quad (4.31)$$

Вычислим второе слагаемое уравнения (4.23), представляющее производную внутренних сил по параметру a_2 , деленную на k :

$$\frac{\partial A_d}{k \partial a_2} = \frac{\partial}{\partial a_2} \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz. \quad (4.32)$$

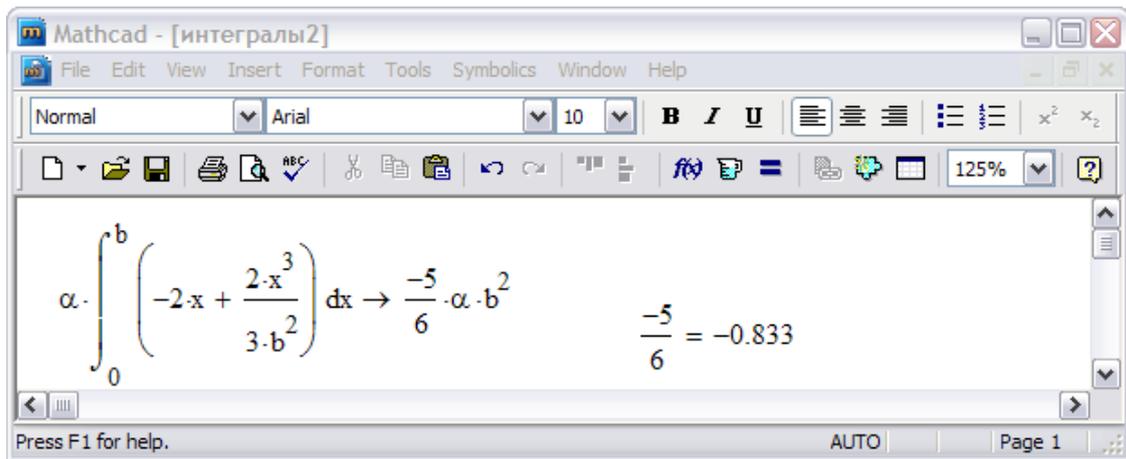


Рис. 4.33. Результаты решения (4.31)

Для этого находят значение интенсивности деформации сдвига Γ . При плоской деформации, когда $\varepsilon_y = 0$, имеем $\gamma_{yz} = \gamma_{xy} = 0$, $\varepsilon_z = -\varepsilon_x$:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_x^2 + 4\varepsilon_x^2 + \frac{3}{2}\gamma_{zx}^2} = \sqrt{4\varepsilon_x^2 + \gamma_{zx}^2}. \quad (4.33)$$

Интегрирование уравнения (4.32) после подстановки в него из выражения (4.33) значение Γ , являющегося корнем квадратным из многочлена, невозможно. Поэтому, используя прием приближенного решения [34], находят

$$\frac{\partial A_0}{k \partial a_2} = \frac{2}{\varepsilon} a_2 b h \left(0.213 + 0.648 \frac{b^2}{h^2} + 0.026 \frac{h^2}{b^2} \right). \quad (4.34)$$

Подставим в уравнение (4.23) значение слагаемых из выражения (4.31) и (4.34):

$$\frac{2}{\varepsilon} a_2 b h \left(0.213 + 0.648 \frac{b^2}{h^2} + 0.026 \frac{h^2}{b^2} \right) = \alpha 0.833 b^2.$$

Отсюда определяем параметр

$$a_2 = \frac{0.416 \varepsilon \alpha \frac{b}{h}}{0.213 + 0.648 \frac{b^2}{h^2} + 0.026 \frac{h^2}{b^2}}. \quad (4.35)$$

Значения коэффициента α , характеризующего влияние трения, находят по эмпирической формуле

$$\alpha = f + \frac{b}{8h}(1-f)\sqrt{f}, \quad (4.36)$$

где f – коэффициент трения.

Таким образом, зная размеры полосы ($2b$ и $2h$), обжатие ε и коэффициент трения f , можно определить значение параметров a_1 и a_2 . Подставив значения этих параметров в уравнения (4.24 – 4.27), определяем перемещения и деформации в любой точке сечения полосы.

Полное усилие осадки на единицу длины и половину ширины определим из уравнения (4.19):

$$P = \frac{2}{\Delta h} \left[k \int_0^b \int_0^h \Gamma dx dz + ak \int_0^b u_{z=h} dx \right]. \quad (4.37)$$

Первый интеграл, представляющий работу деформации, представим следующим образом:

$$A_0 = \frac{k}{2\varepsilon} \int_0^b \int_0^h \Gamma^2 dx dz.$$

После подстановки в выражение (4.33) значений ε_x и γ_{zx} и далее значения Γ и интегрирования в MathCAD, получают:

$$A'_0 = 2k\varepsilon bh \left[1 + \left(\frac{a_2}{\varepsilon} \right)^2 \left(0.213 + 0.648 \frac{b^2}{h^2} + 0.026 \frac{h^2}{b^2} \right) \right]. \quad (4.38)$$

Второй интеграл в уравнении (4.37), представляющий работу сил трения, проинтегрируем в MathCAD, подставив значение $u_{z=h}$ из уравнения (4.30):

$$A_{mp} = \alpha k \int_0^b \left(\varepsilon x - 2a_2 x + \frac{2}{3} a_2 \frac{x^3}{b^2} \right) dx = \alpha k \varepsilon b^2 \left(0.5 - 0.833 \frac{a_2}{\varepsilon} \right). \quad (4.39)$$

Подставив в уравнение (4.37) значение A'_0 из выражения (4.38) и A_{mp} из уравнения (4.39), получают значение полного усилия на единицу длины полосы. Разделив полное усилие на половину ширины b и заменив k на $\sigma_m^* / 2$, находят значение удельного давления:

$$p = \sigma_m^* \left[1 + \left(\frac{a_2}{\varepsilon} \right)^2 \left(0.213 + 0.648 \frac{b^2}{h^2} + 0.026 \frac{h^2}{b^2} \right) + \left(\alpha \frac{b}{h} \right) \left(0.250 - 0.416 \frac{a_2}{\varepsilon} \right) \right]. \quad (4.40)$$

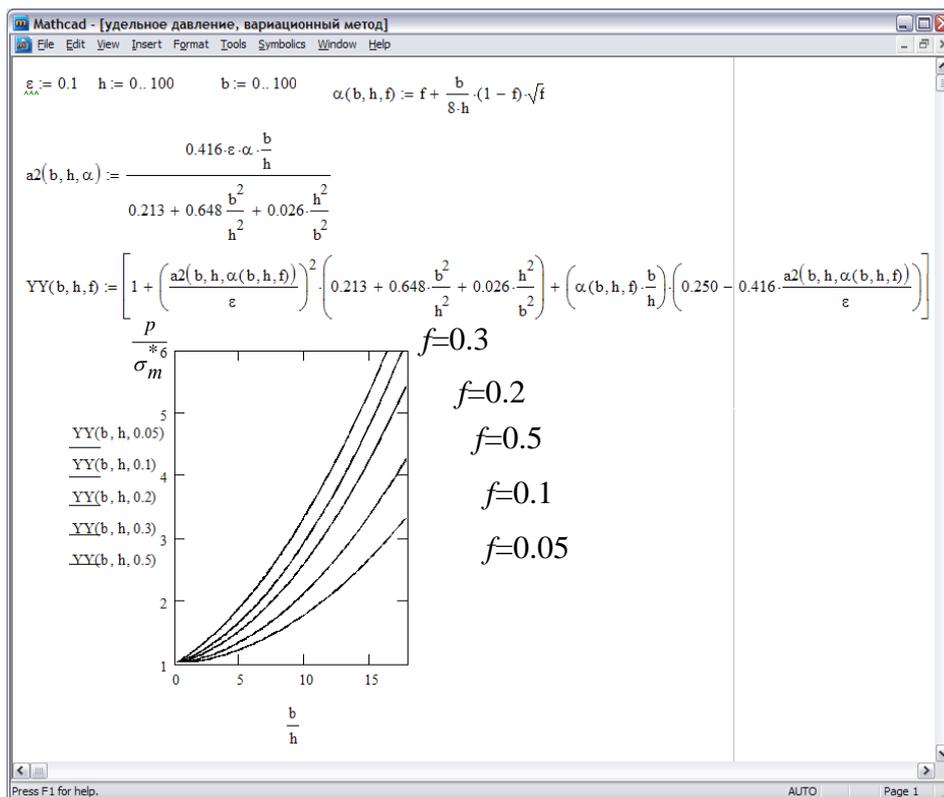


Рис. 4.34. Графическая зависимость отношения удельного давления к сопротивлению деформации от формы сечения

На рис. 4.34 графически представлена зависимость отношения удельного давления к сопротивлению деформации $YY = p / \sigma_m^* = \phi\left(\frac{b}{h}, f\right)$ от формы сечения (отношения b/h) при различных коэффициентах трения, реализованная в среде MathCAD.

4.4. Обработка экспериментальных данных с помощью Microsoft Excel и MathCAD

Конечная цель проведения эксперимента – установление функциональной связи (зависимости) между варьируемыми параметрами и выходным параметром, а также описание этой зависимости математической формулой.

Каждый эксперимент состоит из ряда опытов. В опыте принимаются разные значения исследуемого параметра. Для обеспечения требуемой точности эксперимента в каждом опыте проводится определенное количество повторений или дублей. Например, для обеспечения уровня надежности (доверительной вероятности) 0,9 количест-

во дублей в опыте должно быть не менее пяти. Для обеспечения уровня надежности (доверительной вероятности) 0,95 количество повторений должно быть не менее семи.

В основном для обработки экспериментальных данных с применением ЭВМ используют метод наименьших квадратов (метод Гаусса).

Рассмотрим применение программы Excel для получения аппроксимирующих функций. Получены экспериментальные данные зависимости коэффициента напряженного состояния n_σ от фактора формы очага деформации l/h_c при прокатке высоких полос [40] (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Экспериментальные данные зависимости коэффициента напряженного состояния n_σ от фактора формы очага деформации l/h_c при прокатке высоких полос

$x = l/h_c$	0,18	0,2	0,22	0,25	0,28	0,33	0,4	0,5	0,66	1,0
$y = n_\sigma$	2,01	2,10	1,78	1,81	1,60	1,42	1,50	1,19	1,05	1,03

Задают экспериментальные данные в Microsoft Excel в столбец «А» значения x , в столбец «В» значения y . Выделяют введенные значения, далее нажимают кнопку «Мастер диаграмм» на панели «Стандартная» и в открывшемся окне выбирают тип «Точечная», затем переходят к следующему шагу, нажав кнопку «Далее». В шаге 2 в «Диапазоне данных» выбирают ряды в «столбцах» и нажимают кнопку «Готово» (рис. 4.35). В результате получается график с экспериментальными данными.

Для получения аппроксимирующей зависимости в Excel нажимают правой кнопкой мыши на поле графика на любую экспериментальную точку и выбирают в меню «Добавить линию тренда». В открывшемся окне выбирают тип линии «Логарифмическая» и в закладке «Параметры» ставят галочки в «Показывать уравнение на диаграмме» и «Поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации» (рис. 4.36).

В результате получается аппроксимация логарифмической зависимости $Y = 0,8582 - 0,6498 \ln(x)$, коэффициент корреляции 0,9.

Но в работе [40] эта зависимость аппроксимирована другой формулой:

$$n_\sigma = 0,75 + 0,25(l/h_c)^{-1}.$$

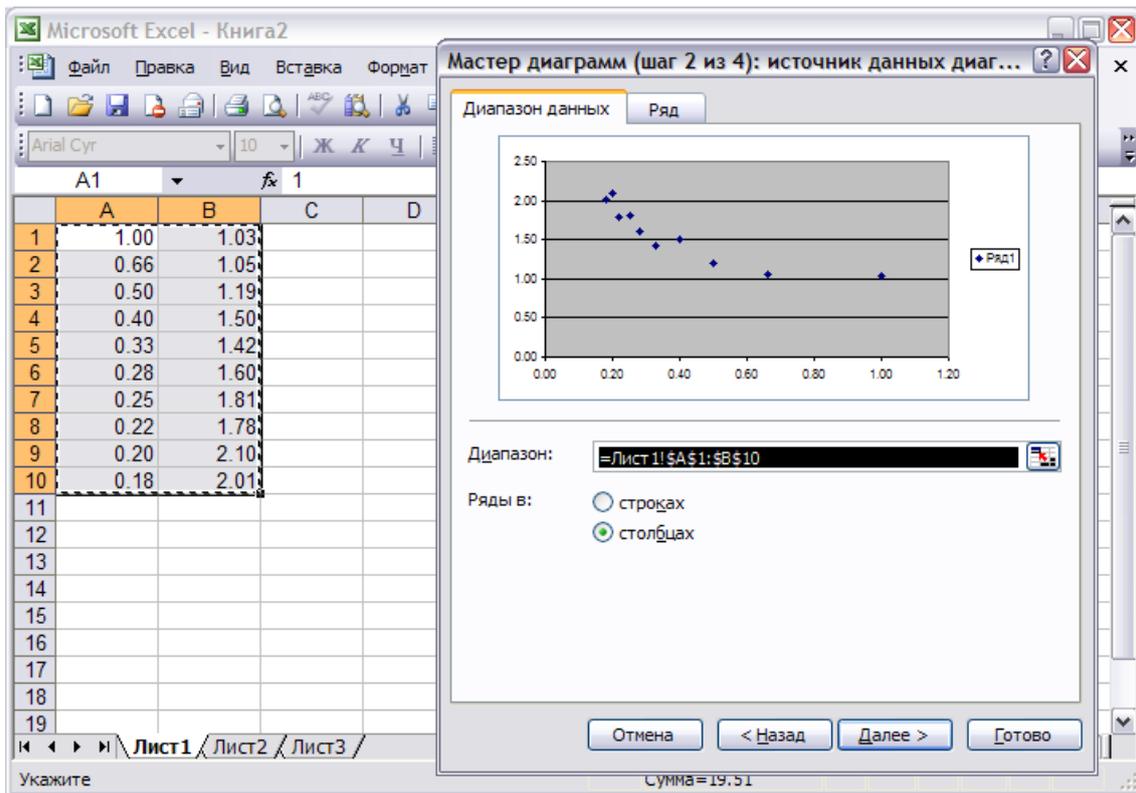


Рис. 4.35. Построение графика экспериментальных данных

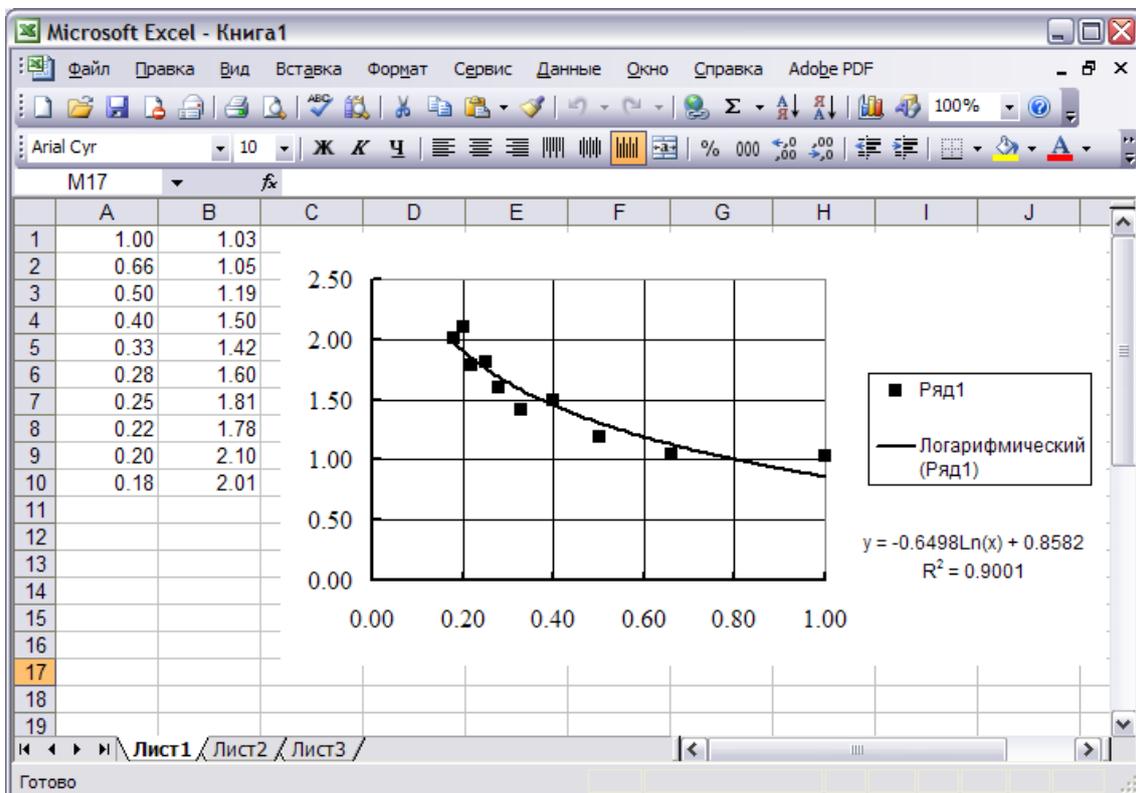


Рис. 4.36. Аппроксимация данных в Excel логарифмической зависимостью

Путем изменения параметра $x = l/h_c$ на $x = h_c/l$ можно получить из нелинейной зависимости – линейную (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Экспериментальные данные зависимости коэффициента напряженного состояния n_σ от фактора формы очага деформации h_c/l при прокатке высоких полос

$X = h_c/l$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$y = n_\sigma$	1,03	1,05	1,19	1,50	1,42	1,60	1,81	1,78	2,10	2,01

Далее в Excel заносят полученные данные и повторяют все действия по построению графика, описанные ранее. В результате получается следующая зависимость: $y = 0,2452 \cdot x + 0.7521$, коэффициент корреляции 0,95 (рис. 4.37).

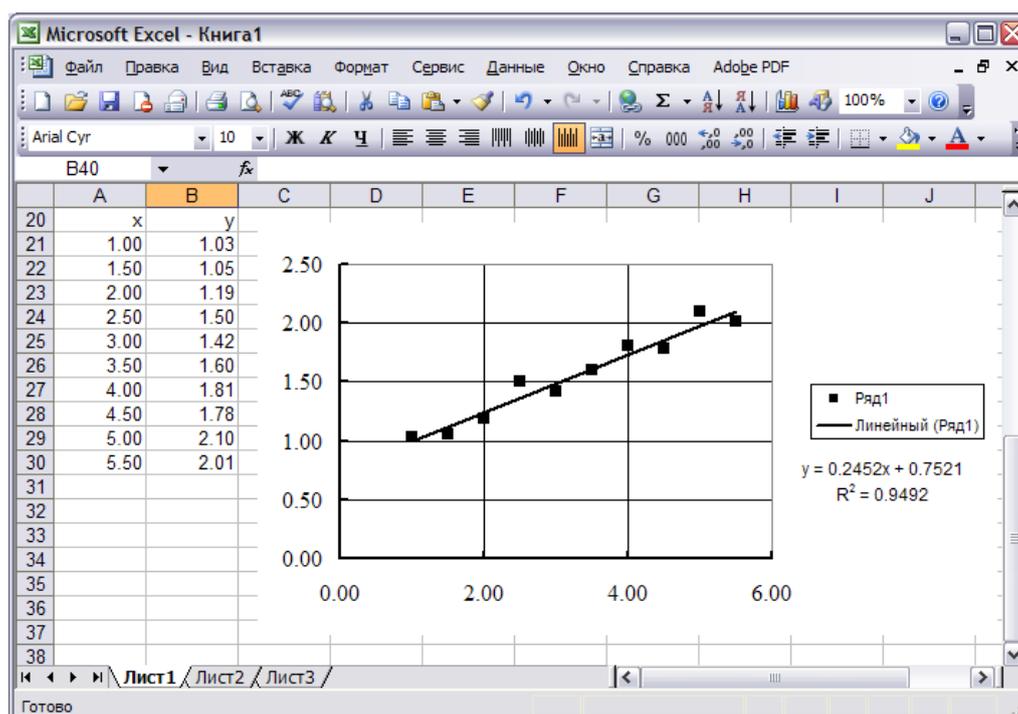


Рис. 4.37. Линейная аппроксимация зависимости коэффициента напряженного состояния n_σ от фактора формы очага деформации h_c/l при прокатке высоких полос

Данный пример наглядно показывает, как правильный подбор параметров позволяет сделать зависимость линейной.

Далее рассмотрим реализацию многомерной регрессии в среде MathCAD. Например, получены экспериментальные данные дефор-

мационного упрочнения алюминия марки А7 при скорости деформации 10 с^{-1} при различных температурах от 300 до 600 °С [41] (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Экспериментальные данные деформационного упрочнения σ , МПа алюминия марки А7 при скорости деформации 10 с^{-1}

Температура, °С	Относительная деформация, ϵ								
	0.05	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
300	54	60	64	65	66	67	68	70	73
350	43	48	52	54	54	55	56	57	59
400	35	40	42	43	44	45	46	47	49
500	23	30	32	33	34	35	36	37	38
600	18	24	26	26	27	27	28	29	30

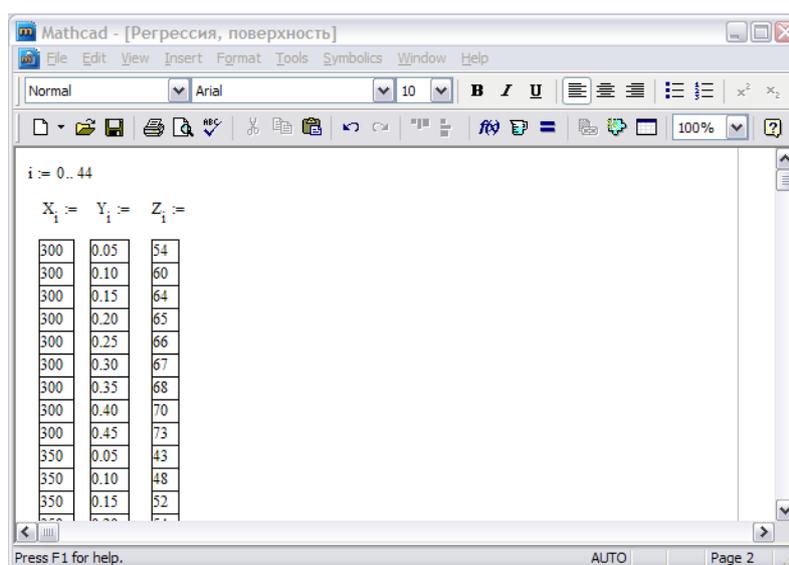


Рис. 4.38. Ввод экспериментальных данных в MathCAD

Для построения в MathCAD аппроксимирующей функции необходимо:

- задание количества экспериментальных данных $i = 0 \dots 44$.
- задание экспериментальных данных: температуры в X_i , относительной деформации в Y_i , сопротивления деформации в Z_i (рис. 4.38).
- определение матрицы M с помощью оператора `augment`, объединяющего значения X и Y (рис. 4.39).
- определение степени полинома n , например 4.

- определение вектора R функцией $\text{regress}(M, Z, n)$, возвращающего 17 коэффициентов при степени полинома $n = 4$.
- определение аппроксимирующей функции $f(x, y)$, возвращающей значение при заданных x и y (рис. 4.39).

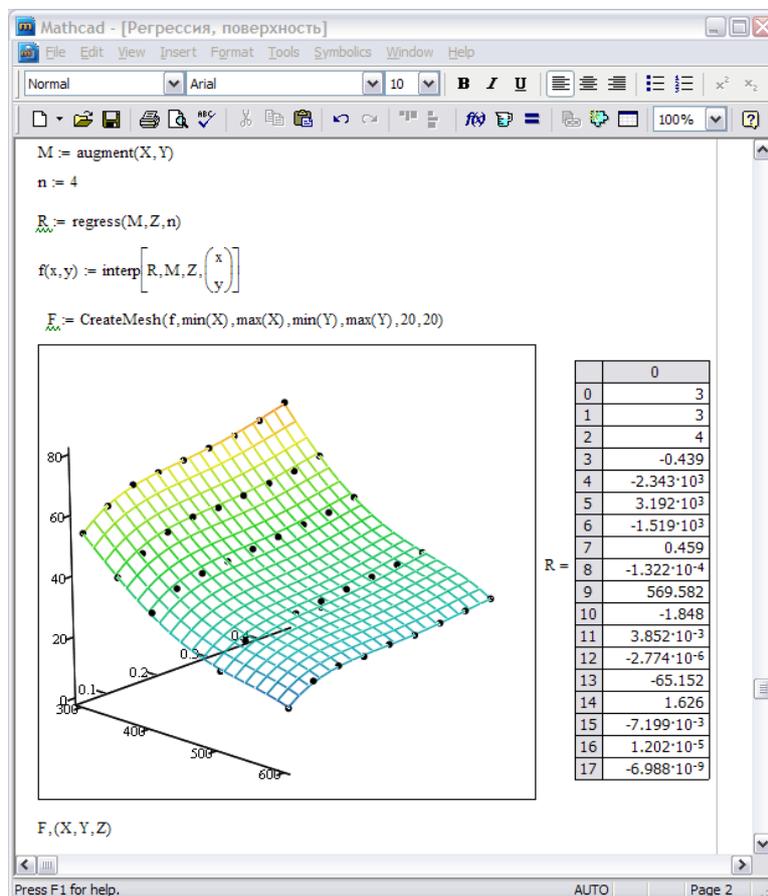


Рис. 4.39. Построение аппроксимированной поверхности

Для графического отображения экспериментальных данных и полученной аппроксимированной поверхности необходимо использовать функцию CreateMesh и график поверхности Surface Plot с панели Graph , как показано на рис. 4.39.

4.5. Реализация поиска экстремума функций в среде MathCAD

Поиск экстремума функции одной переменной имеет самостоятельный интерес, так как является составной частью многих методов многомерной оптимизации. От правильной организации одномерного поиска существенно зависит успех решения всей задачи.

Рассмотрим реализацию в MathCAD поиска локального и условного экстремума [34].

Для этого в MathCAD имеются две встроенные функции, которые могут применяться как в пределах вычислительного блока, так и автономно:

1) $\text{Minimize } f(x_1, \dots, x_m)$ – вектор значений аргументов, при которых функция f достигает минимума;

2) $\text{Maximize } f(x_1, \dots, x_m)$ – вектор значений аргументов, при которых функция f достигает максимума,

где $f(x_1, \dots, x_m)$ – функция; x_1, \dots, x_m – аргументы, по которым производится минимизация (максимизация).

В качестве примера приведена задача численного поиска экстремумов полинома четвертой степени следующей функции:

$$f(x) = x^4 - 3x^3 + 2x^2 + x - 0.5.$$

График данной функции изображен на рис. 4.40.

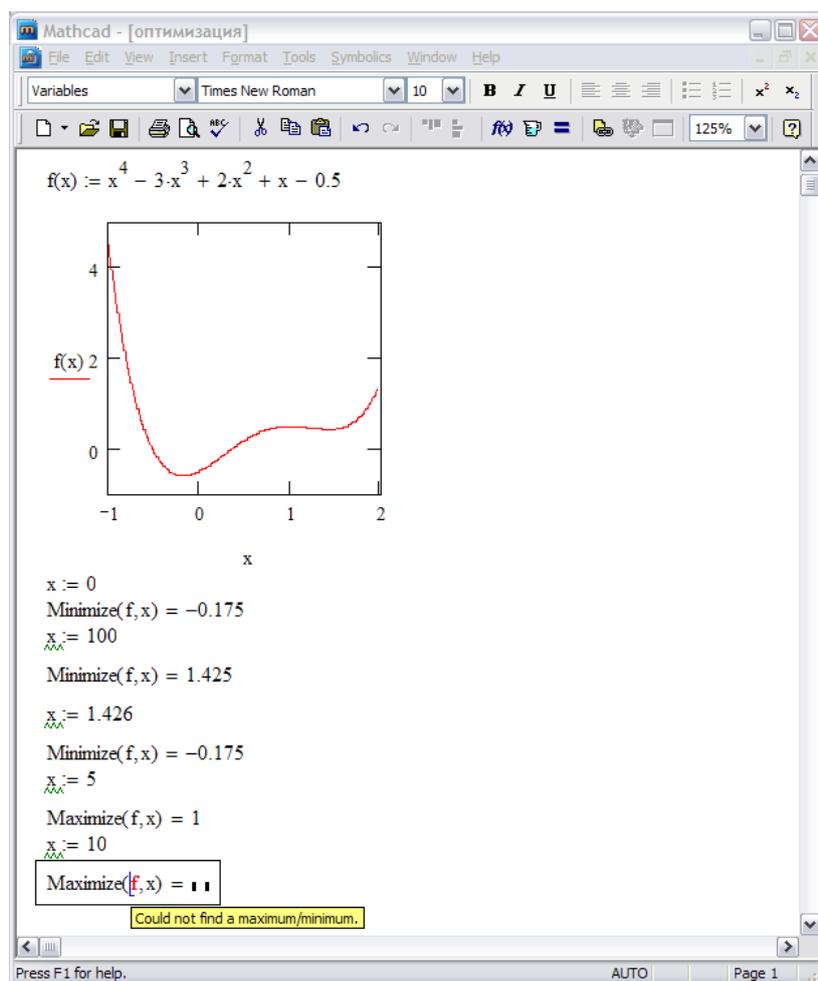


Рис. 4.40. Поиск минимума и максимума функции $f(x)$

Как известно, парабола четвертой степени имеет три точки экстремума, и все они видны на рис. 4.40.

Всем аргументам функции f предварительно следует присвоить некоторые значения, причем для тех переменных, по которым производится минимизация, они будут восприниматься как начальные приближения. Примеры вычисления локальных экстремумов функции одной переменной показаны на рис. 4.40. Поскольку никаких дополнительных условий в них не вводится, то поиск экстремумов выполняется для любых значений x от $-\infty$ до ∞ .

Как видно из рис. 4.40, существенное влияние на результат оказывает выбор начального приближения, в зависимости от чего в качестве ответа выдаются различные локальные экстремумы. Целесообразно сопоставить результаты минимизации с графиком функции $f(x)$. Здесь функция Minimize находит глубокий минимум $x = -0.75$. А вот определить второй (плохо выраженный) минимум можно лишь случайно, выбирая определенные начальные значения x . Даже если взять начальное приближение x в непосредственной близости от этого локального минимума (третий пример), численный метод все равно дает первый, более глубокий минимум $f(x)$.

На рис. 4.40 показаны аналогичные свойства функции Maximize. Если начальное приближение выбрать удачно, то итерационный процесс алгоритма сойдется к максимуму функции, а вот если выбрать его на участке $f(x)$, где неограниченно возрастает (при $x \rightarrow \pm\infty$), то численный метод вообще не справится с задачей, выдавая сообщение об ошибке. Это происходит, потому что начальное приближение $x = -10$ выбрано далеко от области локального максимума, и поиск решения уходит в сторону увеличения $f(x)$, т. е. расходится при $x \rightarrow \infty$.

В задачах на условный экстремум встроенные функции минимизации и максимизации должны быть включены в вычислительный блок, т. е. им должно предшествовать ключевое слово *Given*. В промежутке между *Given* и функцией поиска экстремума с помощью булевых операторов записываются логические выражения (неравенства, уравнения), задающие ограничения на значения аргументов минимизируемой функции. На рис. 4.54 приведены примеры поиска условного экстремума на различных интервалах, определенных неравенствами. Если со сложностью записи условий в MathCAD проблем не возникает, то для проведения вычислений целесообразно сравнить результаты работы MathCAD (рис. 4.40 и 4.41 соответственно).

Как видно (рис. 4.41), если ограничить значения x интервалом, расположенным в окрестности правого локального максимума, с поис-

ком которого мы встретили большие сложности при решении задачи на безусловный экстремум, то этот максимум будет без труда найден численным методом. Следует помнить также об одной особенности, иллюстрируемой рис. 4.41. А именно (в случае максимизации), если на границе интервала $f(x)$ достигает большего значения, нежели на локальном максимуме внутри интервала, то в качестве решения скорее всего будет выдано наибольшее значение (т. е. граница интервала).

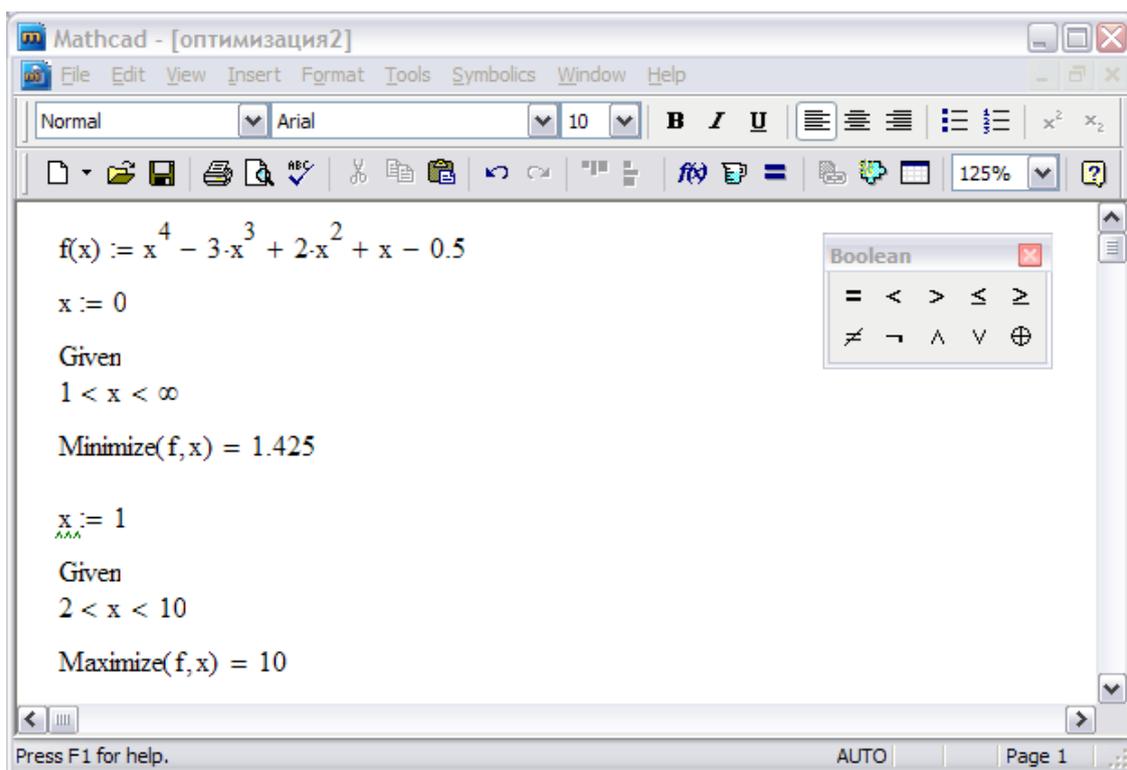


Рис. 4.41. Поиск условного минимума и максимума функции $f(x)$

Конечно, если на рассматриваемом интервале x расположено несколько локальных максимумов, то ответ станет еще менее предсказуемым, поскольку будет напрямую зависеть от выбранного начального приближения. При этом важен его правильный выбор и в случае решения задачи на условный экстремум.

В среде MathCAD существует возможность выбора вручную численного алгоритма минимизации/максимизации. Для этого необходимо нажать правую кнопку мыши на названии функции Minimize/Maximize, привести указатель на пункт Nonlinear и в появившемся меню (рис. 4.42) выбрать один из трех методов:

- 1) сопряженных градиентов (Conjugate Gradient);
- 2) квазиньютоновский (Quasi-Newton);
- 3) метод Левенберга–Маркарда (Levenberg–Marquardt).

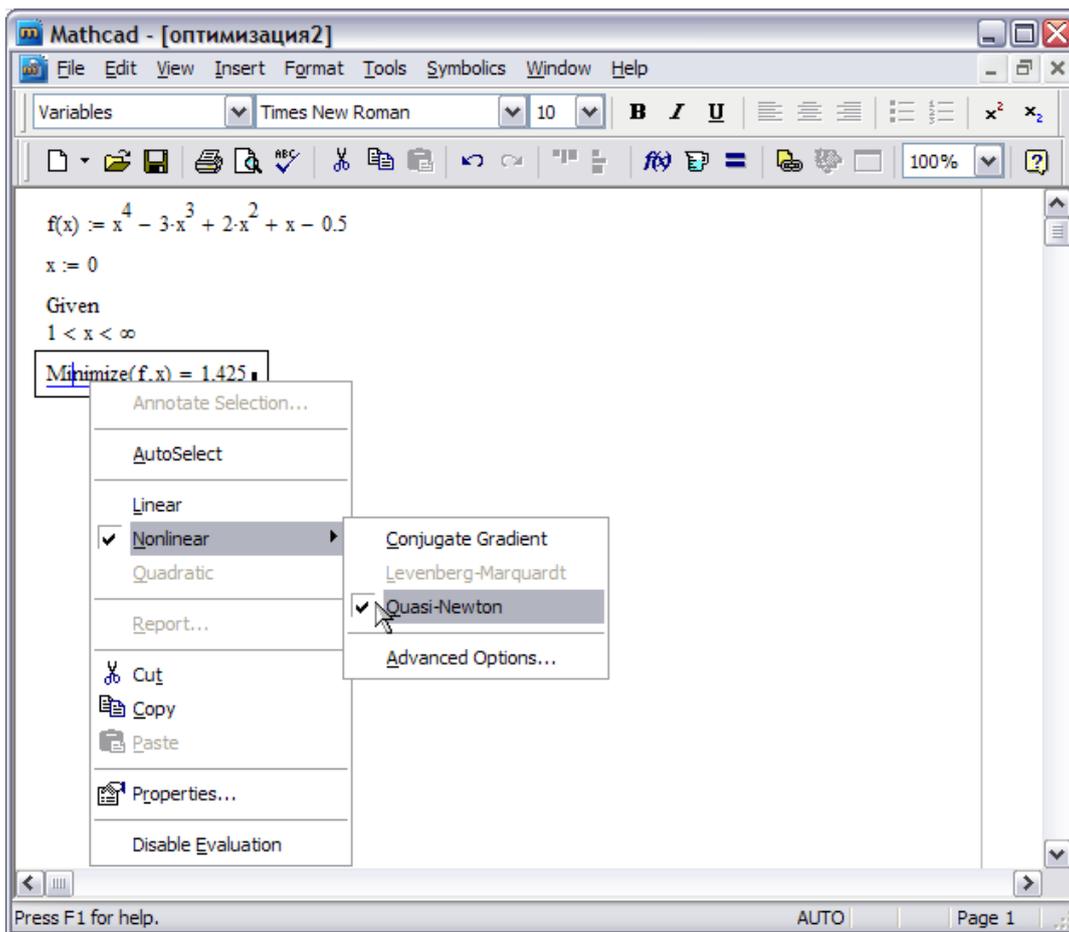


Рис. 4.42. Выбор алгоритма поиска минимума/максимума

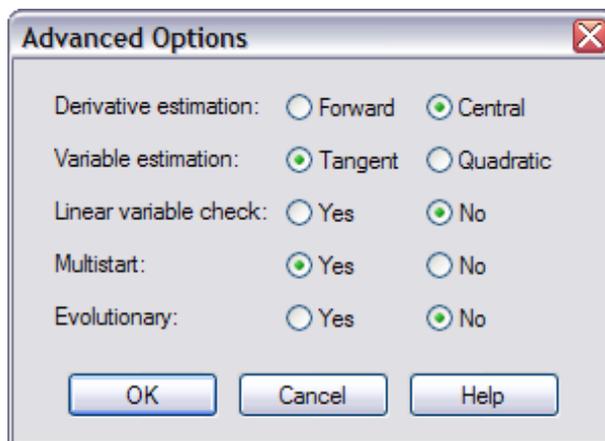


Рис. 4.43. Диалоговое окно настройки дополнительных параметров численных методов

Помимо выбора самих методов имеется возможность устанавливать их некоторые параметры. Для этого нужно вызвать с помощью того же контекстного меню диалоговое окно Advanced Options (Дополнительные параметры), выбрав в контекстном меню пункты

Nonlinear/Advanced options (Нелинейный/Дополнительные параметры). В этом диалоговом окне (рис. 4.43) имеется пять групп переключателей по два в каждой. Для поиска экстремумов используется только одна пара переключателей Multistart, остальные нужны для решения уравнений с помощью функции Find.

Пара переключателей Multistart задает опцию поиска глобального или локального минимума или максимума. Если выставлен переключатель Yes, то MathCAD будет пытаться найти наиболее глубокий экстремум из области, близкой к начальному приближению.

Постановка и решение задач одномерной безусловной оптимизации численными методами в среде MathCAD

Рассмотрим реализацию в MathCAD решения одномерной безусловной задачи: у квадратного листа металла (рис. 4.44) со сторонами, равными 1, по углам вырезаются четыре квадрата [42]. Затем полученная таким образом крестообразная заготовка сгибается в прямоугольную призму без верхней крышки, а четыре шва свариваются. Необходимо рассчитать размер стороны вырезаемых квадратов a , при котором объем коробки будет максимальным.

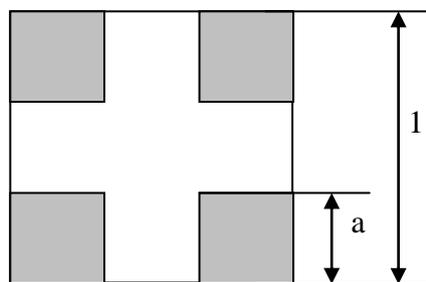


Рис. 4.44. Схема к решению задачи

Проектным параметром в данном случае будет сторона вырезаемого квадрата a .

Определим целевую функцию (максимум, которой нужно найти):

$$V = a \cdot (1 - 2 \cdot a)^2 \rightarrow \max. \quad (4.41)$$

Далее в среде MathCAD задают функцию V и строят график зависимости V от a , указав границы отображения a от 0 до 1 (рис. 4.45). Задают начальное значение $a = 0.1$.

Поиск максимального значения V производят, используя функцию поиска максимума Maximize, как показано на рис. 4.45, и сравнивают найденное решение с графиком.

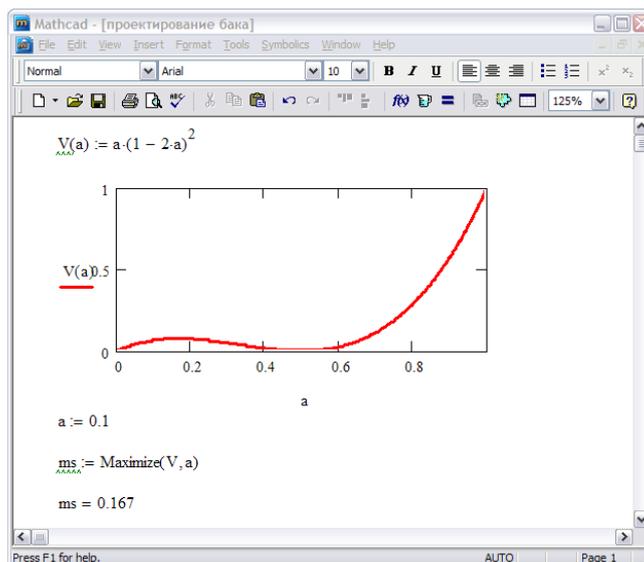


Рис. 4.45. Поиск максимального значения функции $V(a)$

Постановка и решение задачи многомерной оптимизации при наличии ограничений

Рассмотрим реализацию в среде MathCAD следующей задачи [42]: расход жидкости при установившемся истечении через кольцевой канал между двумя концентрическими трубками круглого сечения (жидкость несжимаема, полностью развитое ламинарное течение) определяется формулой

$$Q = K \left[r_0^4 - r_i^4 - \frac{(r_0^2 - r_i^2)}{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)} \right], \quad (4.42)$$

где K – постоянная, зависящая от падения давления на единице длины, плотности и вязкости жидкости, равная 1. Схема конструкции показана на рис. 4.46.

Необходимо найти значения r_i и r_0 , при которых расход жидкости через поперечное сечение площадью 100 мм^2 будет максимален при дополнительном условии: $r_i < r_0$.

Проектными параметрами в данном случае будут радиусы r_i и r_0 . Определим целевую функцию (максимум, которой нужно найти):

$$Q = K \left[r_0^4 - r_i^4 - \frac{(r_0^2 - r_i^2)}{\ln(r_0 / r_i)} \right] \rightarrow \max. \quad (4.43)$$

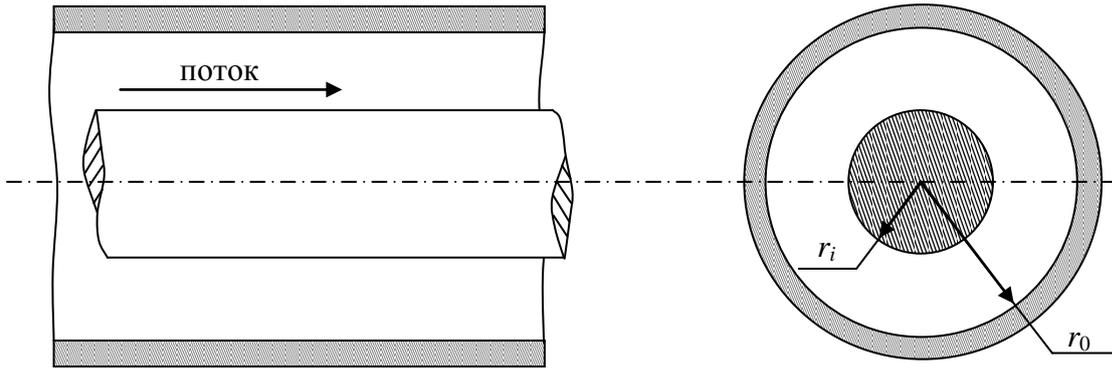


Рис. 4.46. Схема конструкции

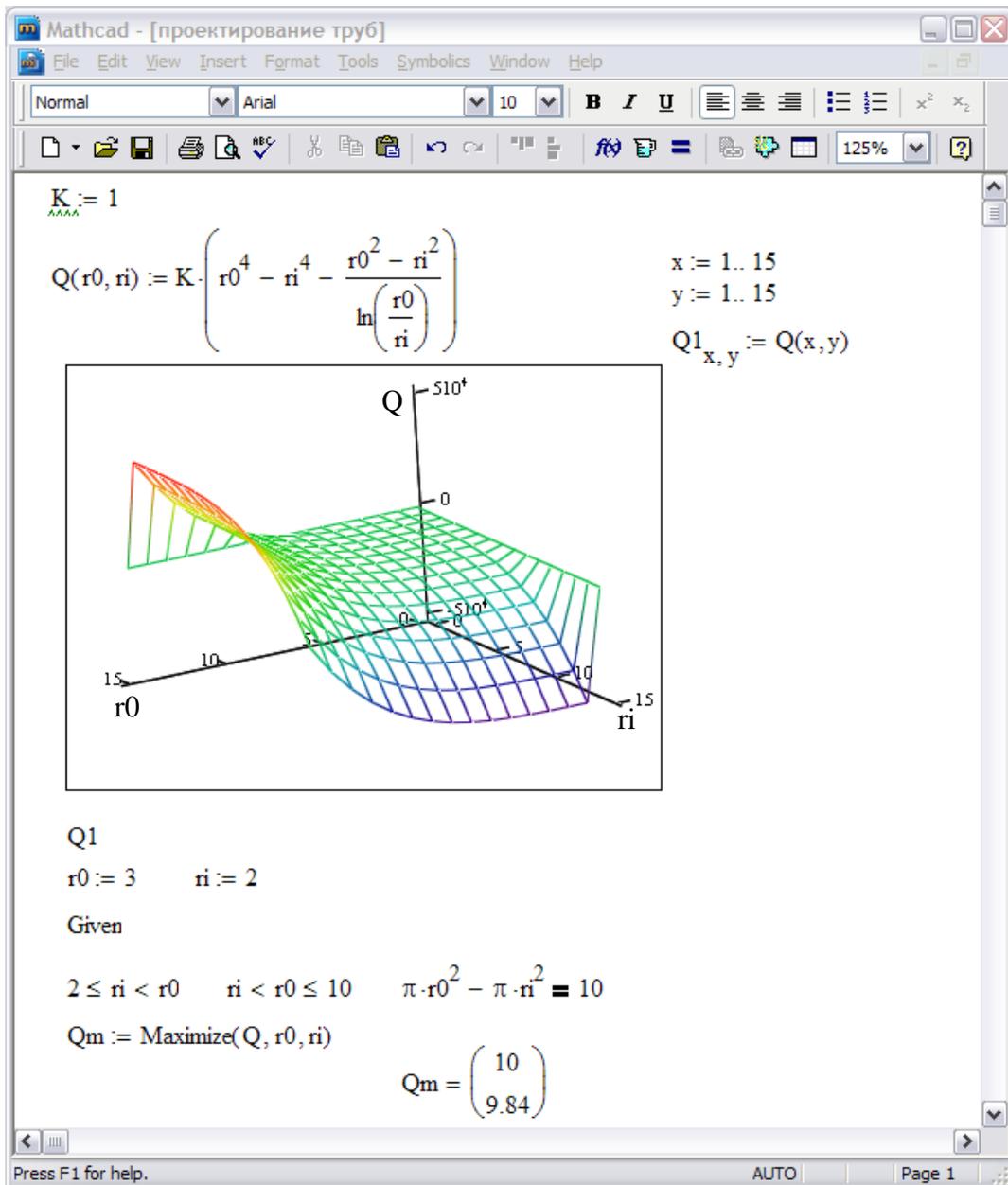


Рис. 4.47. Поиск максимального значения функции Q

Определим ограничения: $2 \leq r_i < r_0$; $r_i < r_0 \leq 10$; $\pi r_0^2 - \pi r_i^2 = 10$.

Далее в среде MathCAD задают функцию Q и строят трехмерный график зависимости Q от r_i и r_0 (рис. 4.47) через функцию $Q1$ в диапазоне x и y от 0 до 15. Задают начальные значения поиска решения $r_i = 2$ и $r_0 = 3$.

Поиск максимального значения Q производят, используя расчетный блок Given/Maximize, как показано на рис. 4.47.

4.6. Средства пакета прикладных программ Ansys для решения задач пластической деформации металла

Рассмотрим моделирование процесса глубокой вытяжки с последующим обратным пружинением с использованием комплекса Ansys и LS-Dyna и исходного файла geom.db [43–46].

Используемые модели процесса показаны на рис. 4.48.

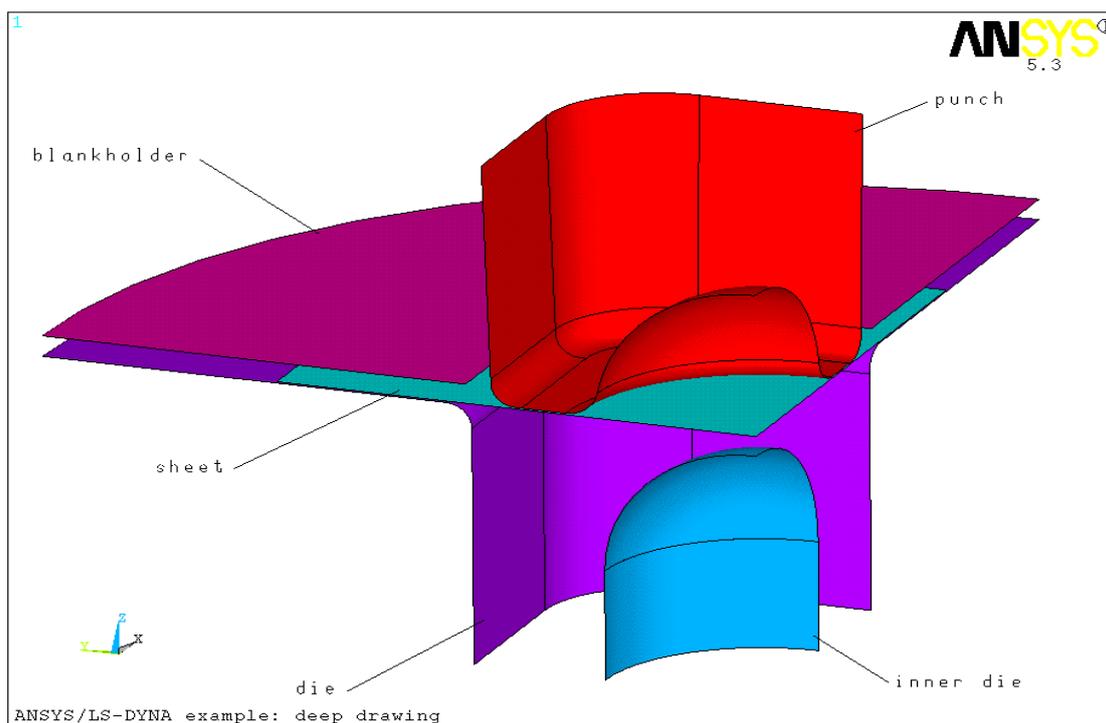


Рис. 4.48. Геометрическая модель процесса (с симметрией)

1. На первом этапе (глубокая вытяжка) деформируемый металлический лист (sheet) помещен между жестко заделанной матрицей (die и inner die) и штампом (punch). Гидравлический привод обеспе-

чивает заданную скорость VZ движения штампа. Лист фиксируется между матрицей (die) и прижимным кольцом (blankholder) заданием прижимного усилия FZ .

2. На втором этапе (обратное пружинение) лист фиксируется по периметру, а рабочие инструменты удаляют.

Использование явного решателя LS-DYNA3D на первом этапе обусловлено существенной физической и геометрической нелинейностью процесса глубокой вытяжки, характеризуемого протяженными контактными поверхностями и большими пластическими деформациями. На втором этапе (упругая разгрузка), напротив, естественно применение неявного решателя (ANSYS).

В силу симметрии рассматривается только четверть модели. Система координат – декартова прямоугольная. Тип конечных элементов для всех частей модели – оболочечные элементы SHELL163 (на втором этапе – SHELL181). Для оболочечных элементов принимается элементная формулировка Belytschko-Wong-Chiang (#10). Модель материала для листа – теория пластического течения с кинематическим билинейным упрочнением (BKIN). Инструменты задаются как абсолютно твердые (Rigid). Единицы измерения, используемые в примере: длина – mm, время – ms, масса – kg, сила – kN.

В табл. 4.4 приведено пошаговое решение примера, где в левой колонке указаны действия пользователя в соответствующих меню через GUI – graphical user interface, а в правой – эквивалентные действия, если их осуществлять при помощи внутреннего языка программирования APDL – Ansys parametrical design language.

Таблица 4.4

Пошаговое решение

Краткое описание команд в GUI-I-interface	Полный командный файл и комментарии
Запуск ANSYS/LS-DYNA Run ANSYS/LS-DYNA	Запуск ANSYSIR.EXE из OS /filnam,deep1 /title, deep drawing
Шаг 1. Explicit анализ	
Main Menu > Preferences>LS-DYNA Explicit	
Вход в препроцессор	
Main Menu > Preprocessor	/prep7 ! Запуск препроцессора

Чтение геометрии	
Utility Menu>Resume from> geom.db>OK	resu,geom,db ! Импортируем геометрию из бинарного файла ! geom.db. Размер листа в плоскости X–Y: 235mm X 235mm ! Толщина 1.6 mm
Задание типов элементов, реальных констант и свойств материалов	
Main Menu > Preprocessor >Element Type > Add/Edit/Delete > Add > LS-DYNA Explicit Thin Shell 163 > OK > Options>... Main Menu > Preprocessor > Material Props Define MAT Model > ... Main Menu > Preprocessor > Real Con- stants > Add > ... Main Menu > Preprocessor > Material Props > Define MAT Model > ...	et,1,163,10 ! Тип элемента – Shell 163, фор- мулировка – ! Belytschko-Wong-Chiang (#10) ! Задаем свойства листа (Sheet) mp,ex,1,70. ! Задаем модуль Юнга, E=70. mp,dens,1,2.7e-4 ! Плотность принимается выше реальной для ускорения расчета mp,nuxu,1,.3 ! Задаем коэффициент Пуассо- на, nu=0.3 tb,bkin,1 ! Модель материала – теория пла- стического течения с билинейным упрочне- нием tbdatt,1,0.06 ! Предел текучести по напряже- ниям = 0.06 tbdatt,2,0.1 ! Касательный модуль = 0.1 r,1,5/6,5,1.6 ! Для листа принимаем 5 точек интегрирования по ! толщине оболочки, толщина = 1.6 mm ! Задаем свойства инструментов (Punsh,Die, Blankholder) *do,i,2,4 ! Цикл на языке APDL mp,ex,i,70. mp,dens,i,2.7e-4 mp,nuxu,i,.3 r,i,5/6,3,1,1,1 ! 3 точки интегрирования по толщине = 1 mm *enddo

Продолжение табл. 4.4

	<p>edmp,rigid,2,4,7 ! punch ! Разрешаем только edmp,rigid,3,4,7 ! blankholder ! вертикальные смещения</p> <p>edmp,rigid,4,7,7 ! die : запрещаем все DOF</p>
<p>Построение КЭ сетки для листа (Sheet)</p>	
<p>Main Menu > Preprocessor > Meshing>Mesher Opts>...</p> <p>Utility Menu > Select > Entites > Areas >By Attributes> Material Num> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrls >Global> Size> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Mesh>Areas>Mapped> ...</p>	<p>mshkey,1 ! Используем Mapped Meshing</p> <p>asel,s,mat,,1 ! Выбираем поверхность листа</p> <p>esiz,7 ! Задаем max линейный размер элемента = 7 mm</p> <p>amesh,all ! Строим КЭ сетку для листа</p>
<p>Построение КЭ сетки для штампа (Punch)</p>	
<p>Utility Menu > Select > Entites > Areas >By Attributes> Real Set Num> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrls >Global> Size> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrls>Lines> Picked Lines> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Mesh>Areas>Mapped> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Mesh>Areas>Free> ...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing>Mesher Opts>...</p> <p>Main Menu > Preprocessor > Meshing >Mesh>Areas> Target Surface> ...</p>	<p>asel,s,real,,2 ! Выбираем поверхности штампа</p> <p>esiz,20</p> <p>lesiz,14,,16 ! Задаем плотности равномерного разбиения линий</p> <p>lesiz, 9,, 6 ! ## 14, 9, 30, 34, 36 на 16, 6, 8, 4, 8 частей</p> <p>lesiz,30,, 8 ! соответственно</p> <p>lesiz,34,, 4</p> <p>lesiz,36,, 8</p> <p>amesh,4,5 ! Mapped Meshing поверхностей 4 и 5</p> <p>mshkey ! Устанавливаем Free Meshing</p> <p>amesh,13 ! Free Meshing поверхности 13</p> <p>mshkey,2 ! Используем Mapped Meshing, если возможно; иначе</p> <p>! – free Meshing</p> <p>amesh,all ! Завершаем построение КЭ сетки для Punch</p>

Продолжение табл. 4.4

Построение КЭ сетки для прижима (Blankholder)	
Utility Menu > Select > Entites > Areas >By Attributes> Real Set Num> ... Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrl>Global> Size> ... Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrl>Lines> Picked Lines> ... Main Menu > Preprocessor > Meshing >Mesh>Areas>Free> ...	asel,s,real,,3 ! Выбираем поверхность Blankholder esiz,40 lesiz,54,, 4 lesiz,55,, 3 lesiz,56,, 8 lesiz,64,, 3 lesiz,65,, 3 mshkey amesh,all
Построение КЭ сетки для матрицы (Die)	
Utility Menu > Select > Entites > Areas >By Attributes> Real Set Num> ... Main Menu > Preprocessor > Meshing >Size Cntrl>Lines> Picked Lines> ... Main Menu > Preprocessor > Meshing >Mesh>Areas>Mapped> ...	asel,s,real,,4 ! Выбираем поверхности Die и Inner Die mshkey,2 lesiz,39,, 4 lesiz,41,, 8 lesiz,43,, 3 lesiz,47,, 8 lesiz,51,, 3 lesiz,62,, 3 lesiz,16,,16 lesiz,19,,3 amesh,all
Создание идентификаторов (PART)	
При задании нагрузок, контактных связей и др. LS-DYNA3D оперирует упорядоченными тройками Num Elem, Num Mat, Num Real Set, обозначаемыми как Part	
Main Menu> Preprocessor > LS-DYNA Options > Input File/Parts>Parts data>...	edwrite,pcreate ! Создаем Parts: 1 – Sheet, 2 – Punch, ! 3 – Blankholder, 4 - Die

Продолжение табл. 4.4

Постановка граничных условий	
Задание условий симметрии для листа	
<p>Utility Menu > Select > Entites > ...</p> <p>Main Menu> Preprocessor > Loads >Constraints>Apply> -Symmetry B.C.->...</p> <p>Utility Menu > Select > Entites > ...</p> <p>Main Menu> Preprocessor > Loads >Constraints>Apply> -Symmetry B.C.>...</p> <p>Utility Menu > Select >Everything</p>	<p>esel,s,mat,,1 ! Выбираем узлы деформируемого листа,</p> <p>nsle ! расположенные в плоскости YZ (линия #4)</p> <p>nsel,r,loc,x</p> <p>d,all,ux,,,,,roty,rotz ! xz symmetry : исключаются ux, roty, rotz</p> <p>nsle ! Выбираем узлы деформируемого листа,</p> <p>nsel,r,loc,y ! расположенные в плоскости YZ (линия #5)</p> <p>d,all,uy,,,,,rotx,rotz ! xz symmetry</p> <p>alls ! Выбираем все</p>
Задание нагрузок как функций от времени	
Задание вертикальной скорости движения штампа	
<p>Utility Menu > Parameters >Scalar Parameters>...</p> <p>Utility Menu > Parameters >Array Parameters>...</p> <p>Main Menu> Preprocessor > Loads >Specify Loads>...</p>	<p>endtime=100.0 ! Активное время движения штампа = 100 ms</p> <p>zmove=85.0 ! Конечное вертикальное смещение штампа =85 mm</p> <p>nstep=25</p> <p>*afun,rad</p> <p>pi=3.1415927</p> <p>*dim,vtime,array,nstep</p> <p>*dim,vload,array,nstep</p> <p>*do,i,1,nstep ! Задание синусоидального закона изменения</p> <p>t=(i-1)*endtime/(nstep-1) ! скорости с использованием элементов</p> <p>vtime(i)=t ! языка APDL</p> <p>vload(i)=-zmove/2*pi/endtime*sin(pi/endtime*t) ! Скорость штампа</p> <p>*enddo</p> <p>edload,add,rbvz,,2,vtime,vload ! Задаем движение штампа</p>

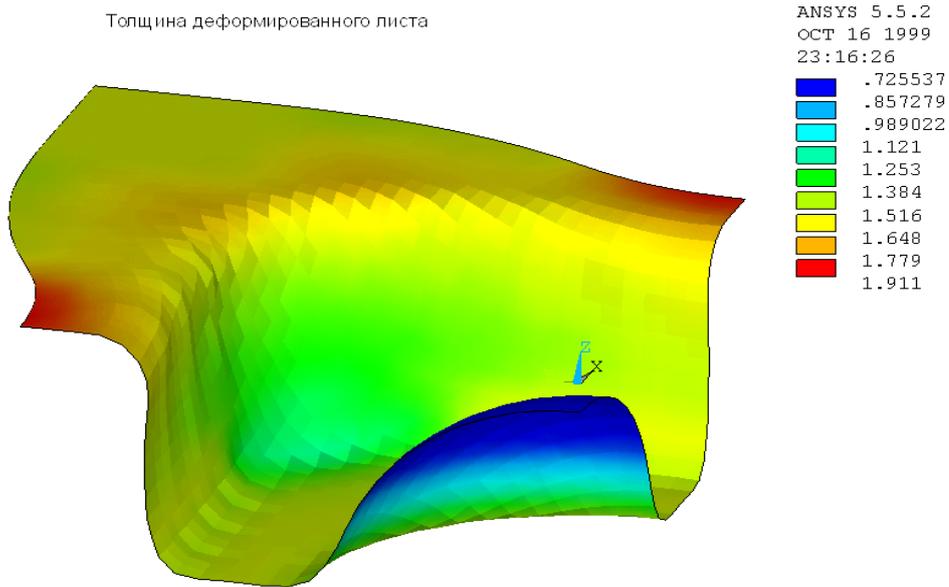
Продолжение табл. 4.4

Задание прижимного усилия	
Main Menu> Preprocessor > Loads >Specify Loads>...	*dim,ftime,array,2 *dim,fload,array,2 ftime(1)= 0.0,200.0 fload(1)= -10.0, -10.0 ! Задаем постоянную силу прижима FZ, edload,add,rbfz,,3,ftime,fload ! равную 10 KN
Задание контактных условий	
Во всех контактных условиях используется один и тот же контактный алгоритм: Поверхность-Поверхность с учетом изменения толщины листа (коэффициент трения покоя = 0.1, верхняя граница вязкого трения = 0.1, демпфирующий фактор = 10%)	
Main Menu> Preprocessor LS-DYNA Options > Contact Optns>Contact Param>... Main Menu> Preprocessor LS-DYNA Options > Contact Optns>Contact Controls>... Main Menu>Solution> LS-DYNA Controls >Default Cntrl> Shell Elem Cntrl>... Main Menu>Solution> LS-DYNA Controls >Control Options>...	edcgen,sts,1,2,0.1,,,0.1,10. ! sheet-punch edcgen,sts,1,3,0.1,,,0.1,10. ! sheet-blankholder edcgen,sts,1,4,0.1,,,0.1,10. ! sheet-die edcontact,,,1 ! Учет толщины листа в контактном алгоритме edshell,,,1 ! Учитываем изменение толщины листа edenergy,1,,1 ! Учитываем Hourglass и Sliding диссипации энергии
Управление счетом и задание выходных данных для постпроцессинга	
Main Menu>Solution> LS-DYNA Controls >Control Options>... Main Menu>Solution> LS-DYNA Controls >File Control> Output Files>... Main Menu>Solution> LS-DYNA Controls >Damping Optns...> System Damping Constant	time,100.0 ! Задаем время окончания первого (Explicit) этапа edrst,100 ! Задаем Output steps (расширенный вывод результатов) edhtime,100 ! Задаем Time-History Output steps edout,glstat ! Указываем информацию о выводе величин edout,matsum ! в Time-History Postprocessor, в частности, ! подлежащую контролю величину энергии Hourglassig modes eddamp,,,0.4 ! Задаем демпфирующий коэффициент save finish

Запуск решателя LS-DYNA3D	
Main Menu>Solution>Solve>...	/solu solve finish
Просмотр результатов расчета Explicit этапа решения (PostProcessing)	
Основными контролируемыми величинами в процессе глубокой вытяжки являются разнотолщинность и остаточные напряжения в продеформированном листе. Выведем эти характеристики после каждого этапа решения.	
Main Menu>General Postproc>Last Set Utility Menu > Select > Entites > ... Input>Pick a menu item>etable,thick,nmisc,4 Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot Element Table> OK	/post1 ! Входим в General Postprocessor /dscale,,1 ! Устанавливаем истинные перемещения set,last ! Считываем последний подшаг esel,s,mat,,1 ! Выбираем узлы только деформируемого листа ! Выводим значение толщин в деформированном листе etable,thick,nmisc,4 ! Толщины в ANSYS можно просмотреть pletab,thick,avg ! с помощью команды ETABLE
Main Menu>General Postproc>- Contour Plot> Nodal Solution>Stress>von Mises	plnsol,s,eqv,0,1 ! Вывод значений эквивалентных напряжений по Мизесу

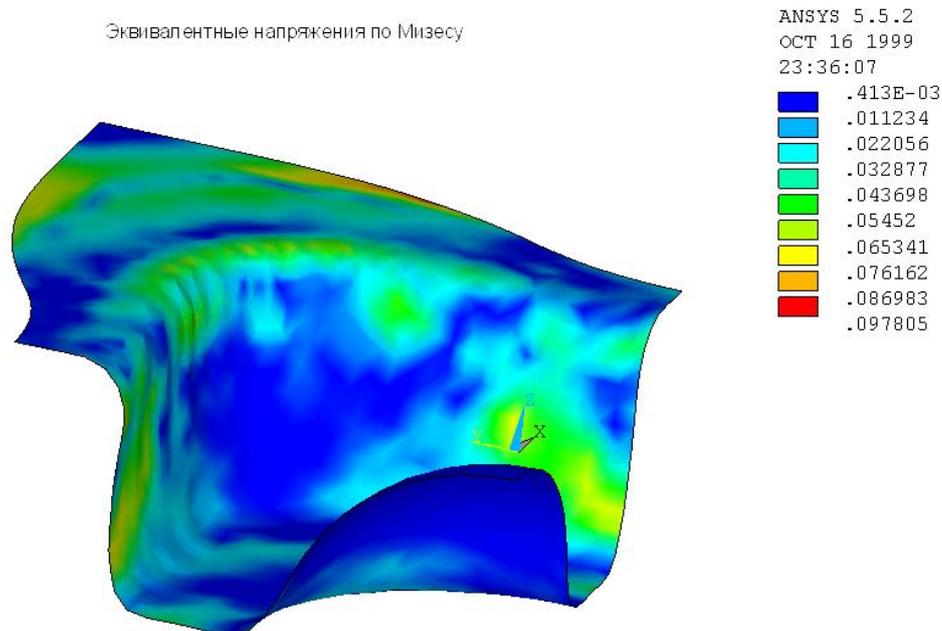
После выполнения последнего действия в постпроцессоре Ansys можно увидеть отрисованную картину распределения толщины листа (рис. 4.49) и эквивалентных напряжений (рис. 4.50).

Однако представленная картина напряжений и деформаций не отражает реального состояния изделия – когда пуансон будет вытягиваться из матрицы. Для этой цели необходимо произвести анализ остаточных напряжений и деформаций в программе Ansys, т. е. использовать напряжения конца процесса пластического деформирования как начальные для расчета процесса деформации без пуансона. Такой переход от явного (Explicit) анализа в LS-Dyna к неявному (Implicit) в Ansys представлен в табл. 4.5.



EXAMPLE ANSYS/LS-DYNA: DEEP DRAWING WITH SPRINGBACK

Рис. 4.49. Распределение толщины листоштампованного изделия



EXAMPLE ANSYS/LS-DYNA: DEEP DRAWING WITH SPRINGBACK

Рис. 4.50. Эквивалентные напряжения в листоштампованном изделии

После получения решения в Ansys выполняют отрисовку напряжений и деформаций так, как на предыдущем шаге (рис. 4.51).

Переход от явного к неявному анализу в Ansys

Шаг 2. Implicit анализ	
Utility Menu>Select>...	ksel, s,,16 ! Создаем узловой компонент To_Impl nslk ! для последующего Implicit этапа cm, To_Impl, node alls save
Start ANSYS/LS-DYNA	
Utility Menu>File>Clear/Start New>... Utility Menu>File>Change Jobname...>deep2 Utility Menu>File>Resume from...>deep1	/filename,deep2 ! Меняем Jobname=deep2 /title, springback resume,deep1,db,,0 ! Считываем базу с предыдущего шага
Main Menu>Preprocessor>Element Type>Swith Elem Type>OK Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Delete>OK Main Menu>Preprocessor>Checking Cntrls>Shape Checking>OFF>OK Utility Menu>Select>... Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Update Geom..>deep1.rst>OK Main Menu>Preprocessor>Loads>Apply>Other>Import Stress>deep1.rst>OK Main Menu>Preprocessor>Loads>Apply>Displacement>... Main Menu>Solution>Analysis Option>Large deform effects> on>OK Main Menu>Solution>-Solve-> Current LS> OK	/prep7 etchg, eti ! Переключаем элементы 163 → 181 (Explicit → Implicit) tbdele, bkin, all ! Убираем нелинейные модели материалов shpp, off ! Отключаем проверку формы элементов esel,s,mat,,1 ! Выбираем элементы и узлы nsle ! деформируемого листа urgeom, 1, last, last, deep1, rst ! В качестве начальной геометрии ! выбирается финальная геометрия с Explicit шага finish /solu rimport, dyna, stress, elem, last, last, deep1, rst ! Импортируем ! начальные напряжения из финального Explicit шага d, To_Impl, uz ! Исключаем движение листа как твердого тела nlgeom, on ! Активизируем опцию больших перемещений solve ! Запуск Implicit решателя и получение решения save finish /post ! Дальнейшие действия по постпроцессингу аналогичны сделанным на первом этапе решения

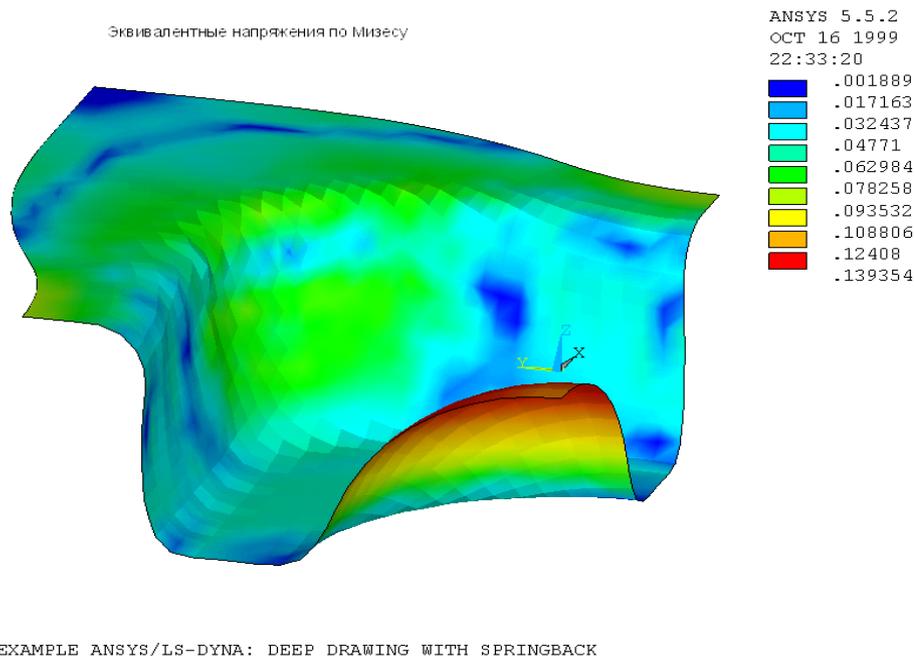


Рис. 4.51. Эквивалентные напряжения в листоштампованном изделии после пружинения

Сравнение результатов моделирования показывает значительное увеличение эквивалентных напряжений после пружинения и подтверждает необходимость проведения анализа остаточных напряжений и деформаций.

4.7. Моделирование с помощью пакета Ansys процесса осадки бруса

Ниже будет рассмотрено моделирование осадки бруса для получения полной и достоверной информации о его напряженном состоянии и формоизменении с учетом реальных механических характеристик металла. Используется комплекс Ansys и LS-Dyna и исходный файл osadka.k [43–46].

Исходные данные: брус размерами $100 \times 200 \times 200$ мм при абсолютно жестких бойках. Свойства материала бруса заданы в исходном файле. В силу симметрии детали достаточно рассмотреть четверть бруса. Моделируется осадка бруса и его разгрузка.

Конечно-элементная модель бруса формируется трехмерными восьмиузловыми твердотельными элементами с одной точкой интегрирования (карта *SECTION_SOLID с параметром elform: 1). Конечно-элементные модели поверхности бойков образованы двумя оболоч-

чечными трехмерными четырехузловыми элементами (карта *SECTION_SHELL с параметром elform: 2) (рис. 4.52).

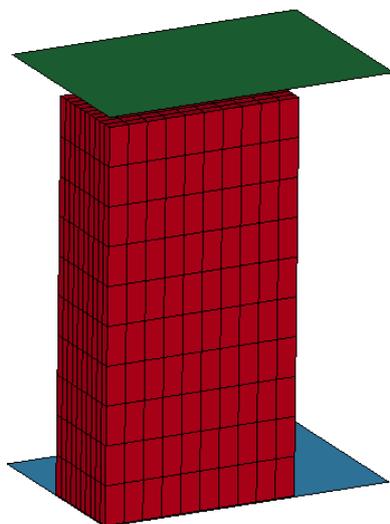


Рис. 4.52. Конечно-элементная модель

Симметричные граничные условия накладываются на узлы заготовки, лежащие на плоскостях симметрии (рис. 4.53); с помощью карты *BOUNDARY_SPC_NODE задают ограничение по соответствующим степеням свободы (нулевые смещения).

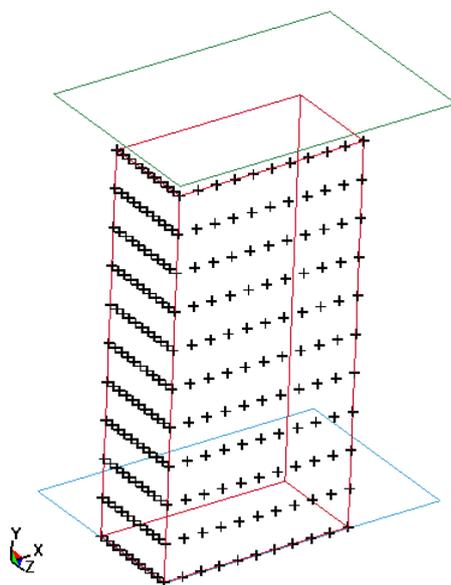


Рис. 4.53. Поверхности с узлами для задания плоскости симметрии

Поверхность нижнего бойка неподвижно закреплена в пространстве (ограничение по всем степеням свободы), а верхний боёк может

перемещаться только вдоль оси Y , данные ограничения производят путём установки соответствующего ключа в карте модели материала *MAT_RIGID для каждой детали соответственно. В качестве нагрузки задаётся одна кривая нагружения (зависимость параметра нагрузки от времени) с помощью *DEFINE_CURVE, график которой приведён на рис. 4.54.

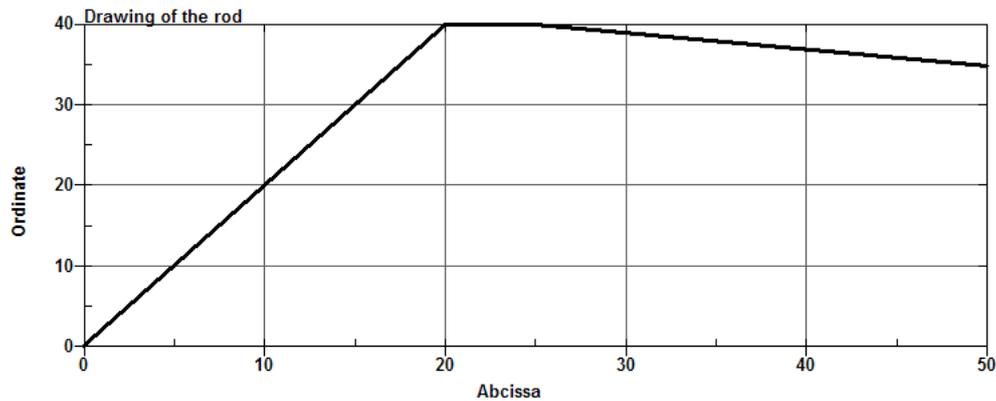


Рис. 4.54. Зависимость смещения верхнего бойка от времени

Смещение верхнего бойка задаётся картой *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID с соответствующими параметрами. Таким образом, в процессе расчёта верхний боёк осаживает брус на 35 мм и останавливается, затем отходит от него.

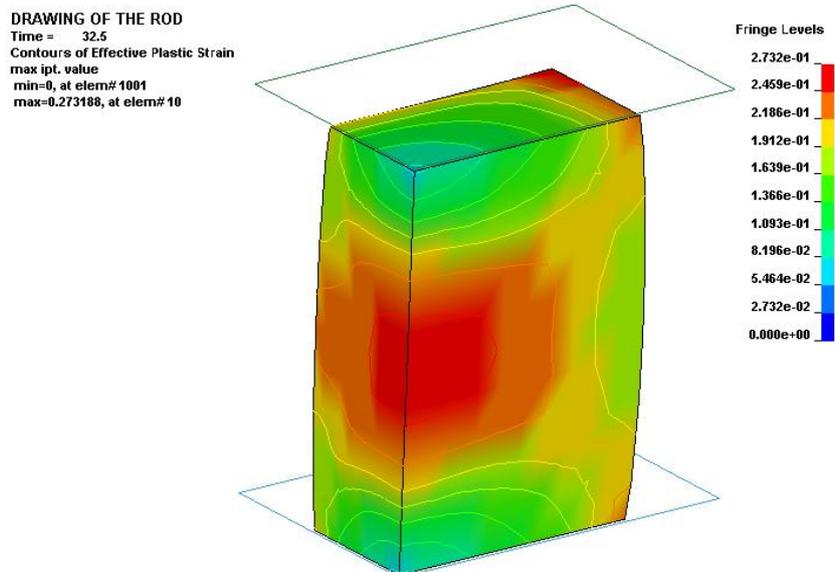


Рис. 4.55. Деформации в брус после 32,5 с от начала процесса

Контакт между брусом и инструментами реализуется включением карты *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE.

При этом брус является «ведомой» частью контакта по отношению к «ведущим» бойкам.

Для определения параметров расчета необходимо найти единственный параметр – время окончания $t_{ок} = 50$ с. Распределение пластических деформаций в брус в различные моменты времени после начала деформирования приведены на рис. 4.55 и 4.56.

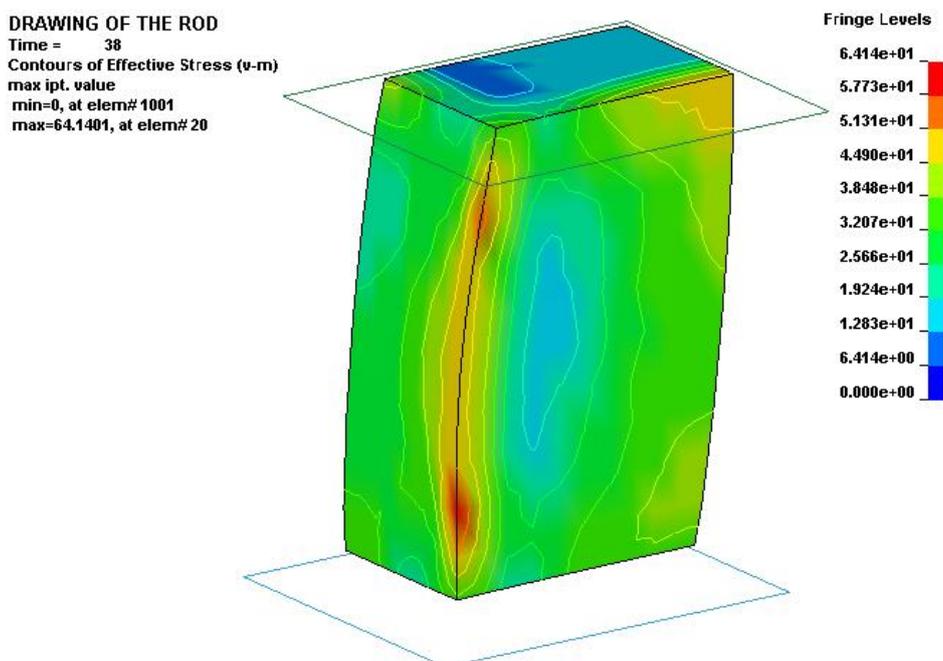


Рис. 4.56. Деформации в брус после 38 с от начала процесса

Таким образом с помощью программного комплекса Ansys и LS-Dyna можно проследить изменение параметров деформации металла в процессе его нагружения при осадке.

4.8. Моделирование с помощью пакета Ansys процесса листовой прокатки

Для моделирования процесса холодной продольной прокатки листов в гладких валках будем использовать программные средства Ansys и LS-Dyna и исходный файл rolling.k [43–46].

Рассмотрим режим прокатки широкого листа из сляба с поперечным сечением 100×790 мм в абсолютно жестких валках. Заготовку длиной $l = 400$ мм из стали 10 прокатывают с относительным обжатием по высоте $\varepsilon = 40$ % на гладкой бочке в бандажированных валках. Внешний и внутренний радиусы бандажа валка равны соответст-

венно $R = 580$ мм и $r = 100$ мм. Свойства прокатываемой полосы приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Свойства прокатываемой полосы

Наименование характеристики	Прокатываемая полоса (материал – Сталь 10)
Модуль упругости E , МПа	210 000
Коэффициент Пуассона μ	0.29
Предел текучести σ_m , МПа	250
Коэффициент трения между полосой и валками	0.45

Моделирование процесса продольной прокатки проводится в среде конечно-элементного пакета LS-DYNA со следующими допущениями:

- механические свойства материала заготовки описывают билинейной зависимостью;
- принимают изотермические условия деформации, т. е. разогрев деформируемого материала и валков не учитывается;
- прокатка считается холодной (температура металла меньше температуры рекристаллизации), т. е. сопротивление деформации не зависит от скорости деформации;
- принимают, что трение на всей поверхности контакта подчиняется закону трения Кулона, причем коэффициент трения постоянен на всей контактной поверхности;
- валки считают абсолютно жесткими.

При прокатке широких полос, т. е. когда выполняется соотношение $b_0/h_0 > 5$, уширением полосы, в сравнении с деформацией в двух других направлениях, можно пренебречь. Таким образом, прокатку широких листов можно решать в плоской постановке в условиях плоскодеформированного состояния. В силу симметрии достаточно рассмотреть половину продольного сечения полосы с одним валком. Моделируется захват полосы валками и установившийся режим прокатки.

Конечно-элементная модель полосы, валка и толкателя (рис. 4.57) формируется из двумерных четырехузловых твердотельных элементов плоского напряжённого состояния (карта *SECTION_SHELL с параметром elform: 13).

Материал валка и толкателя – недеформируемый, для которого применяется модель абсолютно твёрдого материала *MAT_RIGID.

Модель материала полосы *MAT_PLASTIC_KINEMATIC – упруго-пластическая с изотропным упрочнением.

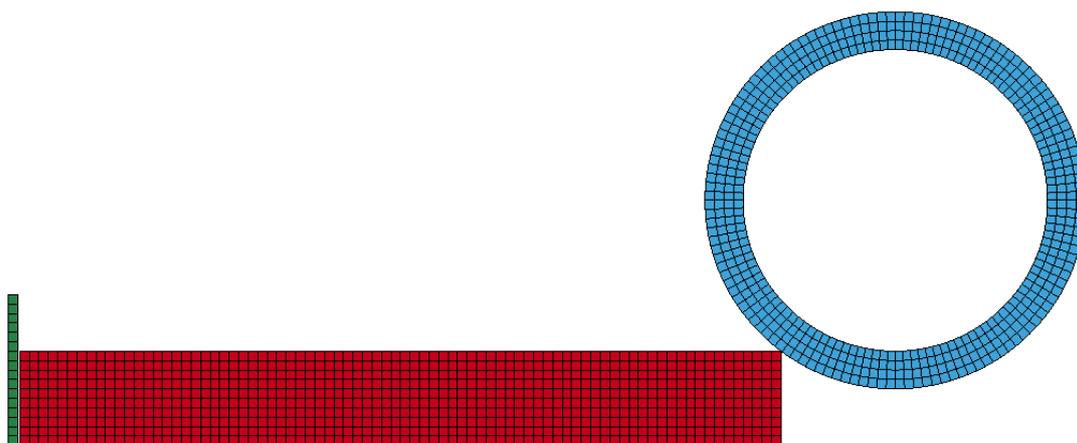


Рис. 4.57. Конечно-элементная модель (половина модели)

Симметричные граничные условия накладываются на узлы заготовки, лежащие на плоскости симметрии, с помощью карты *BOUNDARY_SPC_NODE, задаются ограничения по степеням свободы (смещения Y нулевые).

Валок неподвижно закреплен в пространстве (ограничение по всем степеням свободы, кроме вращательной вокруг оси Z), а толкатель может перемещаться только вдоль оси X , данные ограничения накладываются путём установки соответствующего ключа в карте модели материала *MAT_RIGID для каждой детали соответственно. Задаются две кривые нагружения (зависимость параметра нагрузки от времени) с помощью *DEFINE_CURVE, график которых приведён на рис. 4.58. Вторая кривая – постоянная скорость вращения валка 0.06 рад/мс, что соответствует скорости подачи заготовки. Смещение толкателя и вращение валка задаётся картой *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID с соответствующими параметрами. Таким образом, в процессе расчёта толкатель подаёт лист в валок и останавливается, валок вращается с постоянной скоростью.

Контакт между заготовкой и инструментами реализуется включением карты *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE. При этом заготовка является «ведомой» частью контакта по отношению к «ведущим» – толкателю и валку.

Для определения параметров расчета необходимо определить единственный параметр – время окончания $t_{ок} = 30$ с.

В результате решения необходимо проанализировать полученные пластические деформации и напряжения. Распределение пласти-

ческих деформаций в листе на этапе захвата (5 с от начала процесса) представлено на рис. 4.59, а пластические деформации в установившемся режиме прокатки – на рис. 4.60.

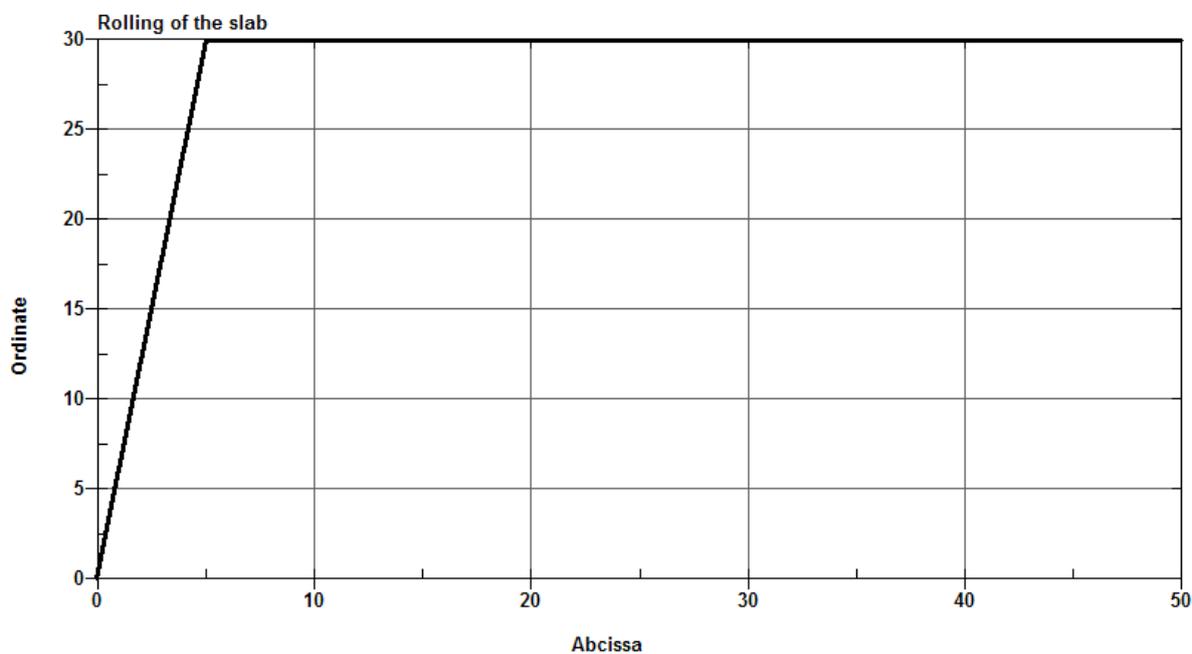


Рис. 4.58. Зависимость смещения толкателя от времени

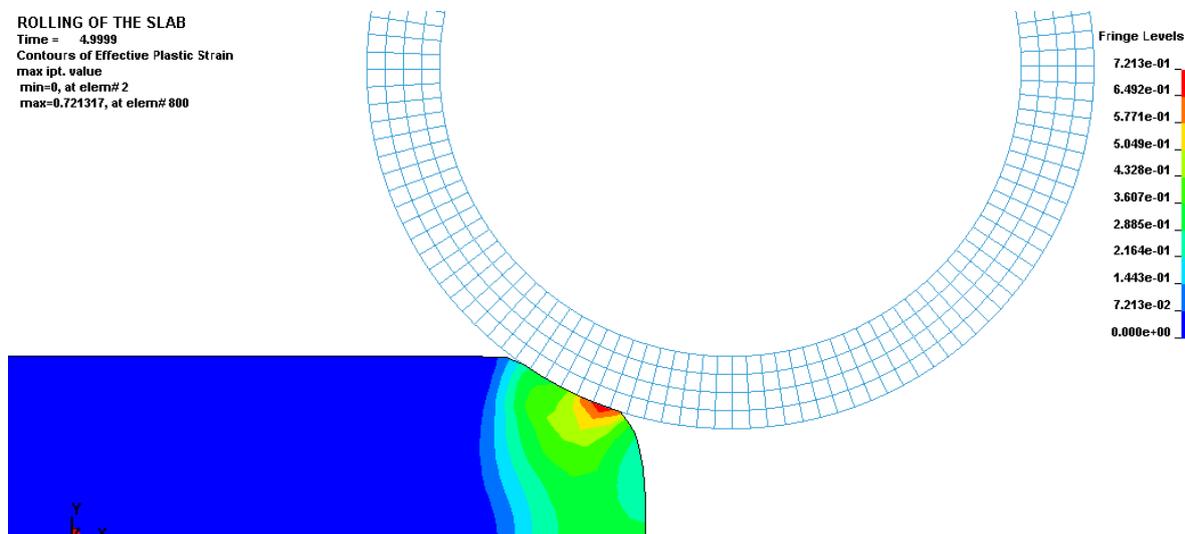


Рис. 4.59. Пластические деформации на 5 секунде

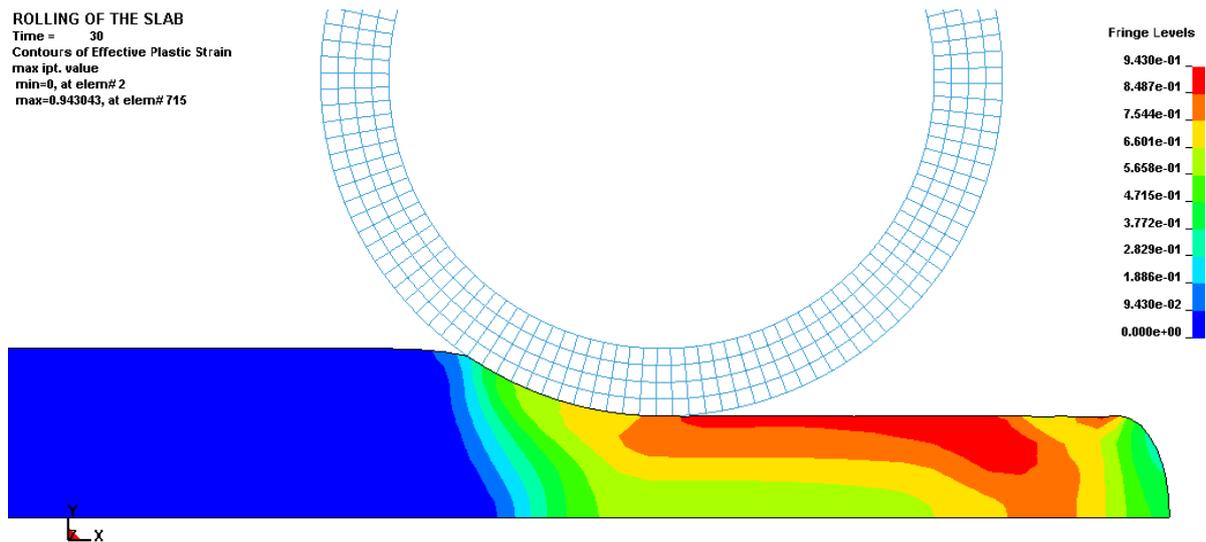


Рис. 4.60. Пластические деформации на 30 секунде

Таким образом с помощью программного комплекса Ansys и LS-Dуна можно проследить изменение параметров деформации металла в процессе его нагружения при прокатке.

Глава 5

ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА DEFORM 3D

5.1. Создание моделей инструментальной оснастки процесса совмещенной прокатки-прессования

Применение методов компьютерного моделирования конструкций узлов, механизмов и машин, а также операций ОМД позволяет существенно облегчить работу технолога и ускорить внедрение в производство новых режимов обработки металлов. Мировые промышленные компании для моделирования конструкций инструментальной оснастки широко применяют системы автоматизированного проектирования и подготовки технической документации. Одной из таких систем является программный пакет Solid Works.

Моделирование в Solid Works осуществляется в несколько этапов:

- на первом этапе создают отдельные модели деталей;
- на втором этапе модели деталей объединяют в сборку;
- завершающим этапом является подготовка конструкторской документации и чертежей для изготовления изделий.

Для практического применения предлагается осуществить моделирование валкового инструмента, матрицы и заготовки процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП) [10] в среде Solid Works и сборку деформационного узла и подготовку моделей для передачи в САЕ-систему Deform 3D.

Создание модели вала с выступом

Запускают Solid Works в меню Пуск → Программы. Выбирают пункт меню Файл → Новый (рис. 5.1).

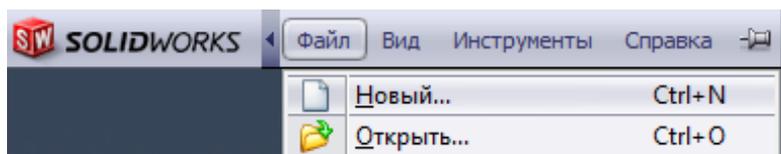


Рис. 5.1

В диалоговом окне выбирают создание детали и нажимают «OK» (рис. 5.2).

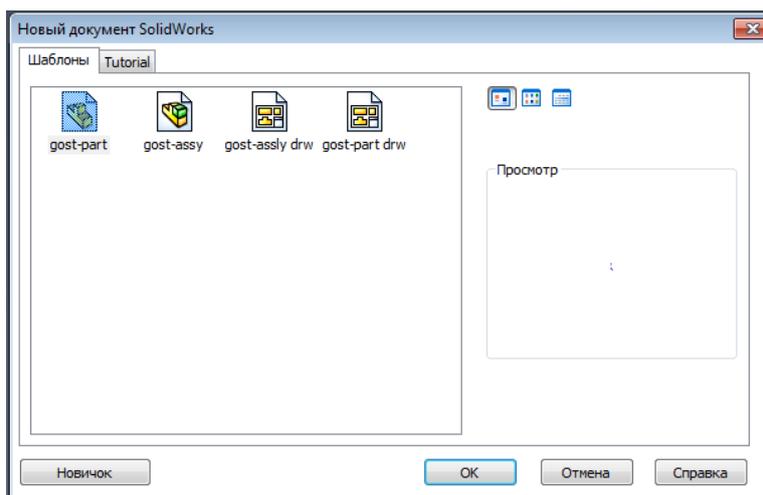


Рис. 5.2

На экране появится внешний вид среды моделирования (рис. 5.3).

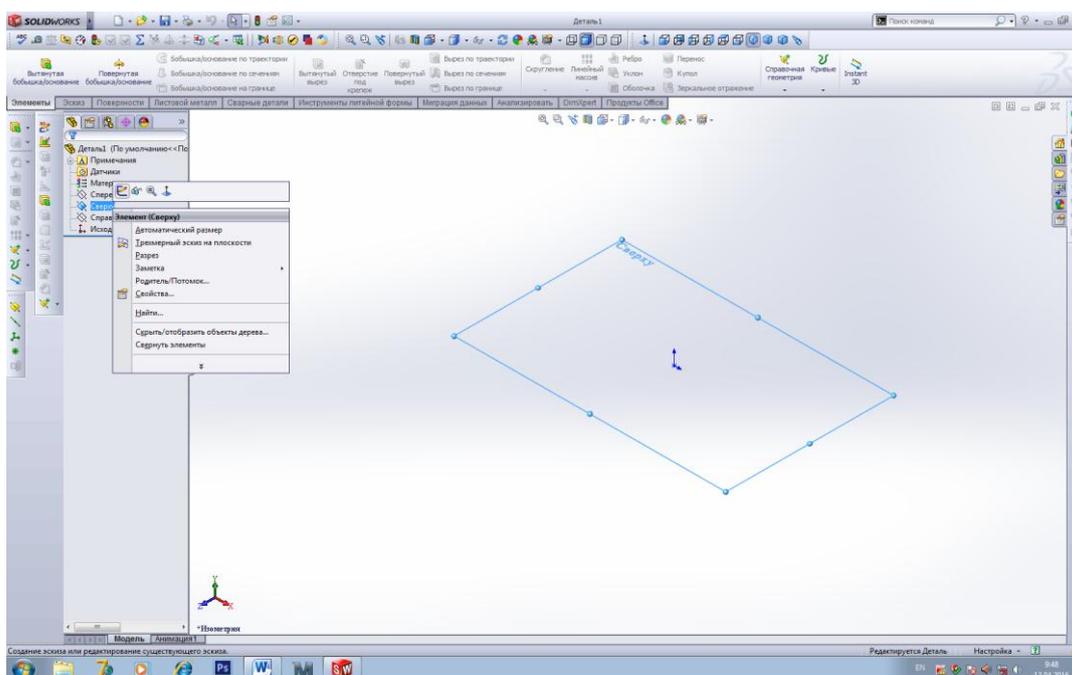


Рис. 5.3

Подготовка модели любого из элементов детали состоит из двух этапов. На первом этапе создается замкнутый эскиз элемента на одной из выбранных плоскостей при помощи инструментов эскиза. На втором на основе эскиза создают сам элемент с применением методов вытягивания, выреза, поворота и др.

В плоскости сверху создают эскиз (рис. 5.3). Для этого нажимаем правой кнопкой мыши на иконке плоскости в дереве объектов и выбираем иконку «Создать эскиз». Выполним построение эскиза по размерам на рис. 5.4.

Далее выходят из эскиза и выбирают пункт «Повернутая бобышка» в меню «Элементы» (рис. 5.5).

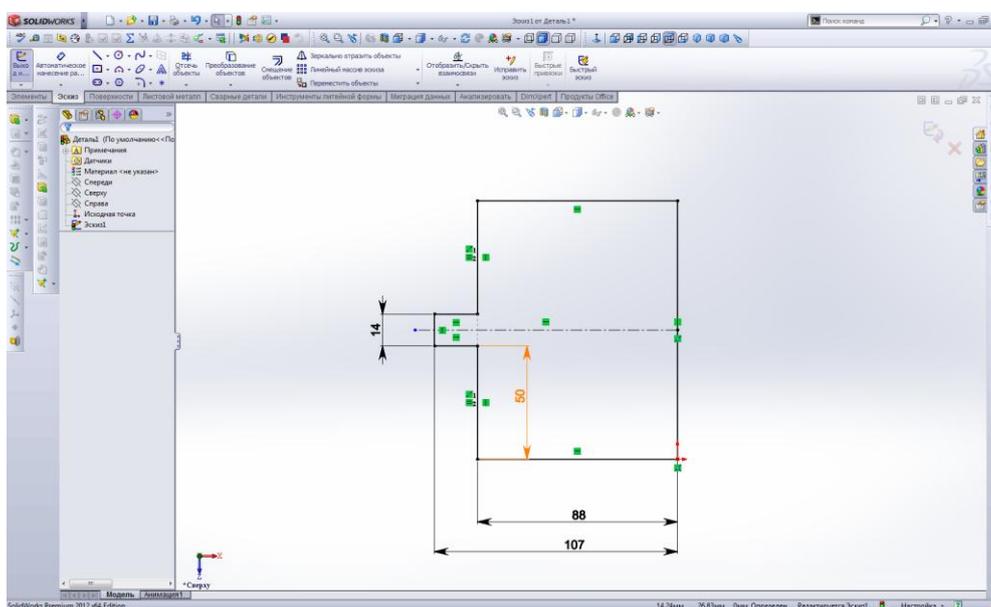


Рис. 5.4

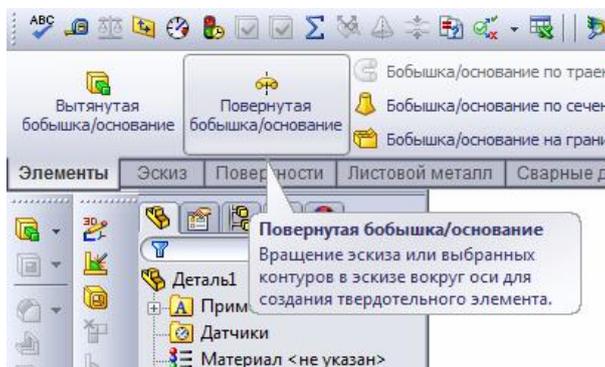


Рис. 5.5

После выбора оси поворота, как показано на рис. 5.6, получают компьютерную модель валка (рис. 5.7) и сохраняют ее (рис. 5.8).

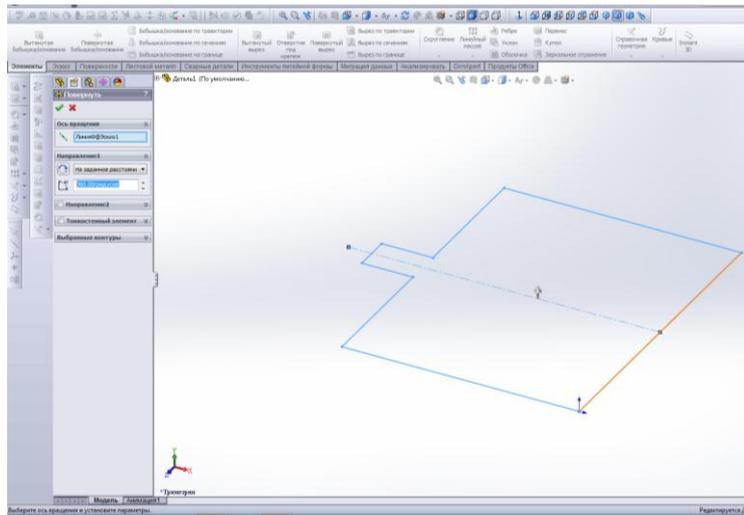


Рис. 5.6

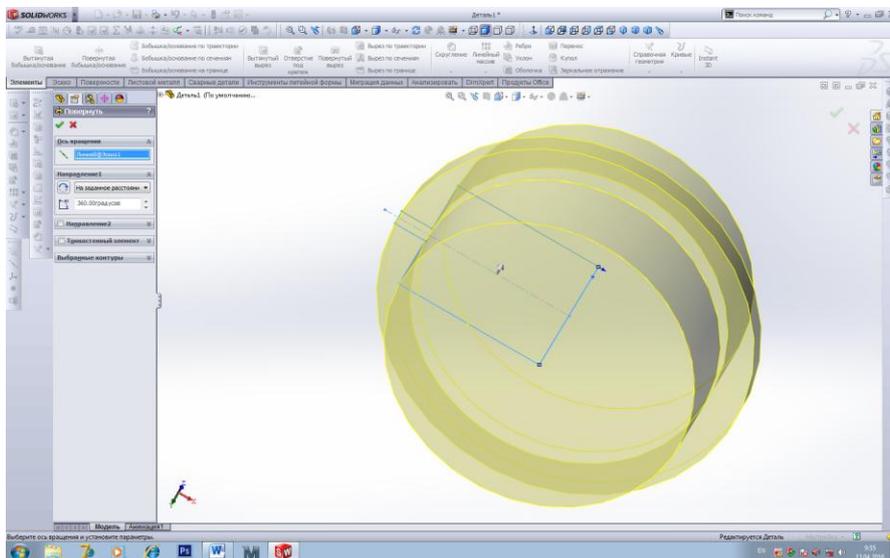


Рис. 5.7

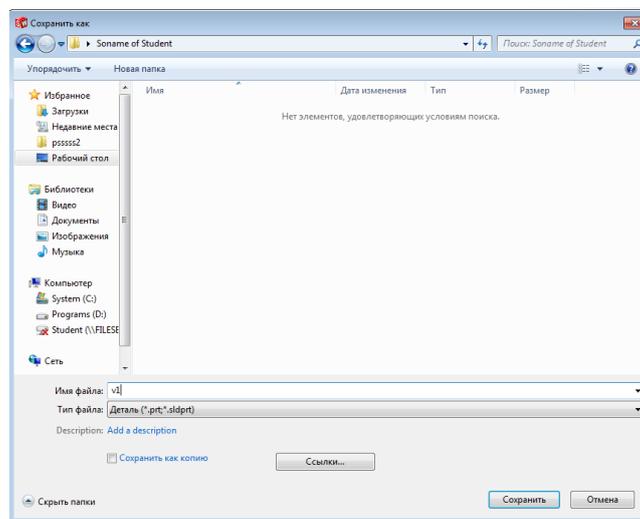


Рис. 5.8

Аналогичным образом проводят моделирование валка с ручьём (рис. 5.9–5.11).

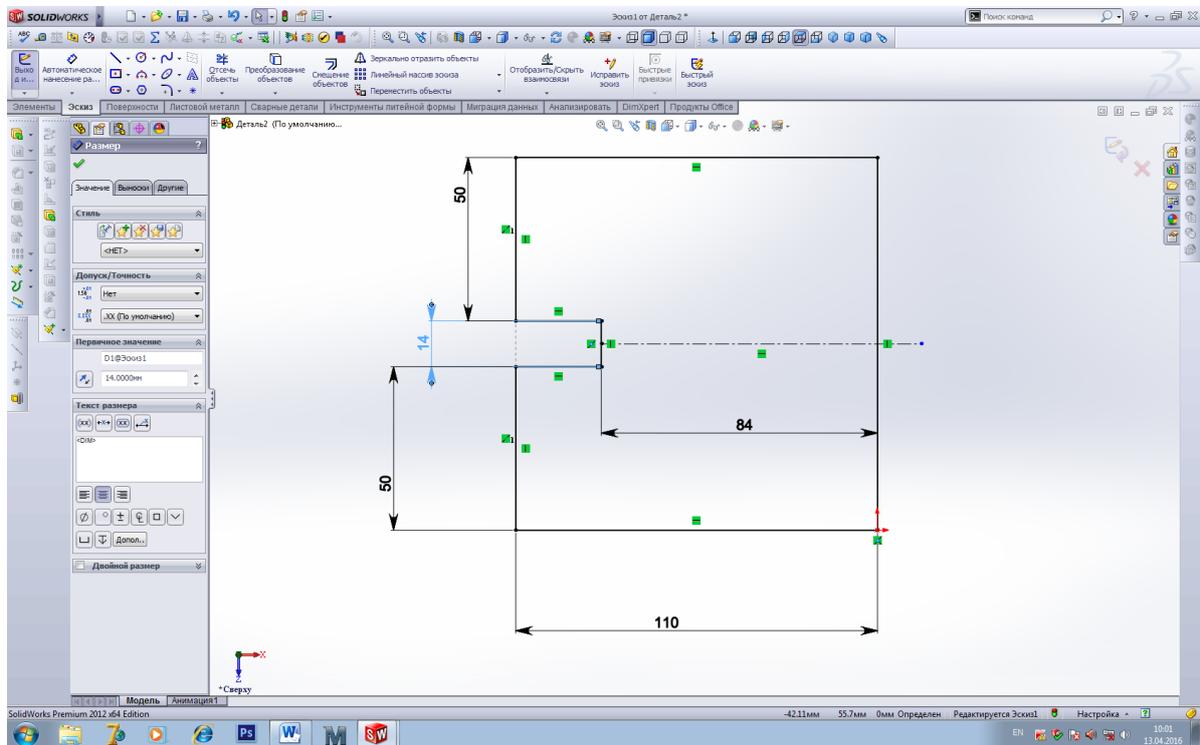


Рис. 5.9

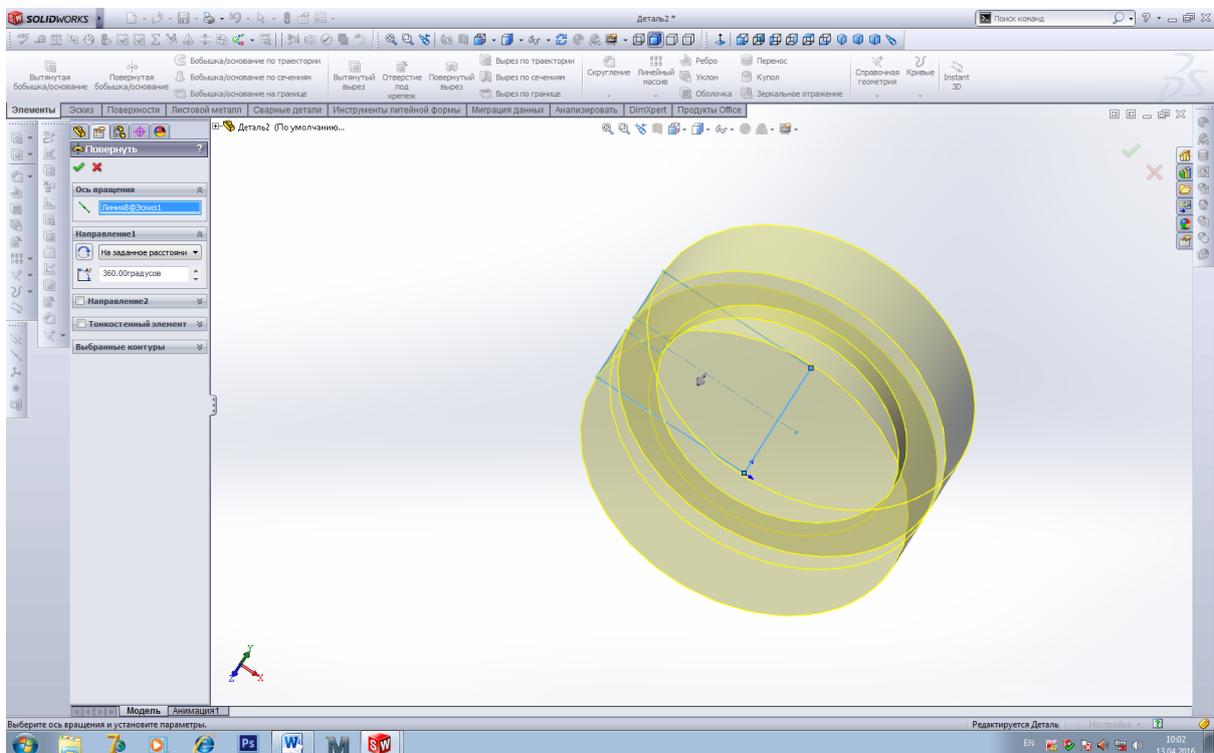


Рис. 5.10

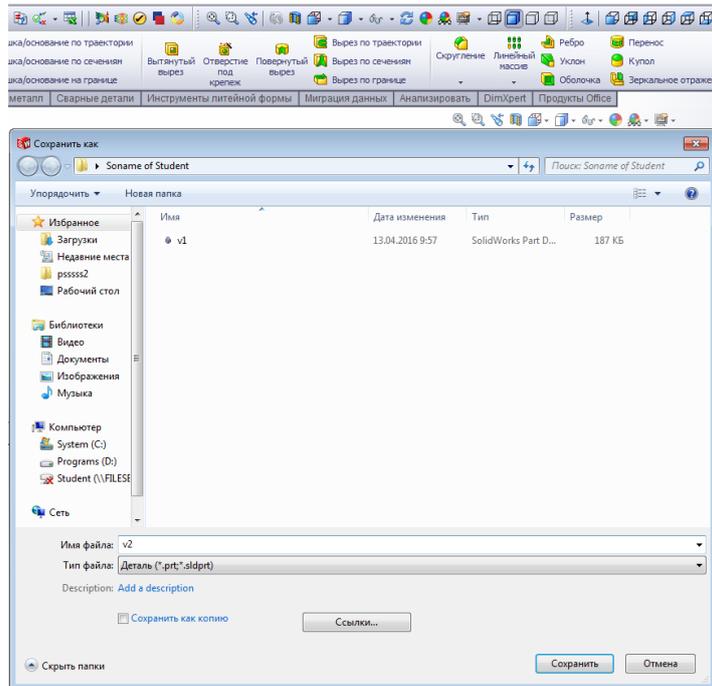


Рис. 5.11

Создание модели заготовки

Для моделирования заготовки создают эскиз (рис. 5.12) в плоскости «Сверху» в дереве объектов.

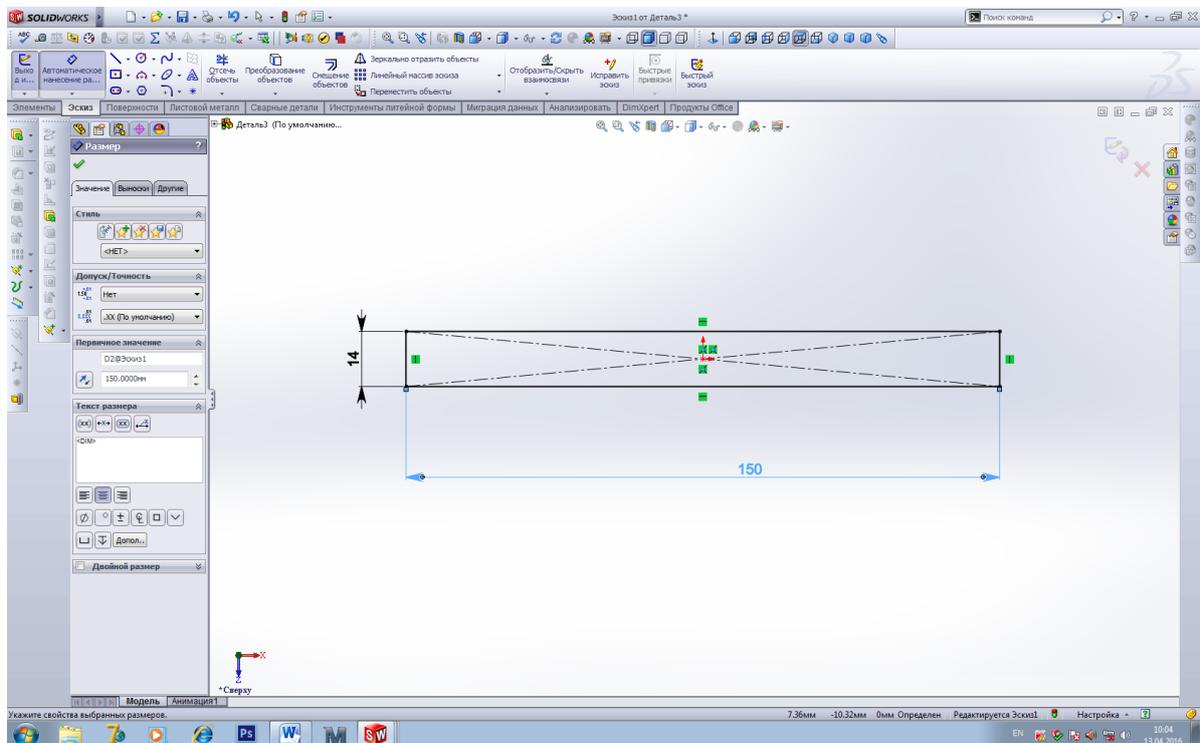


Рис. 5.12

Далее выделяют эскиз и выполняют команду «Вытянутая бобышка» (рис. 5.13, 5.14).

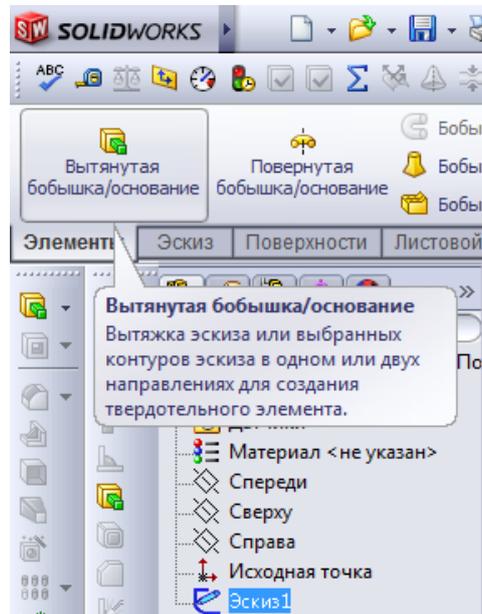


Рис. 5.13

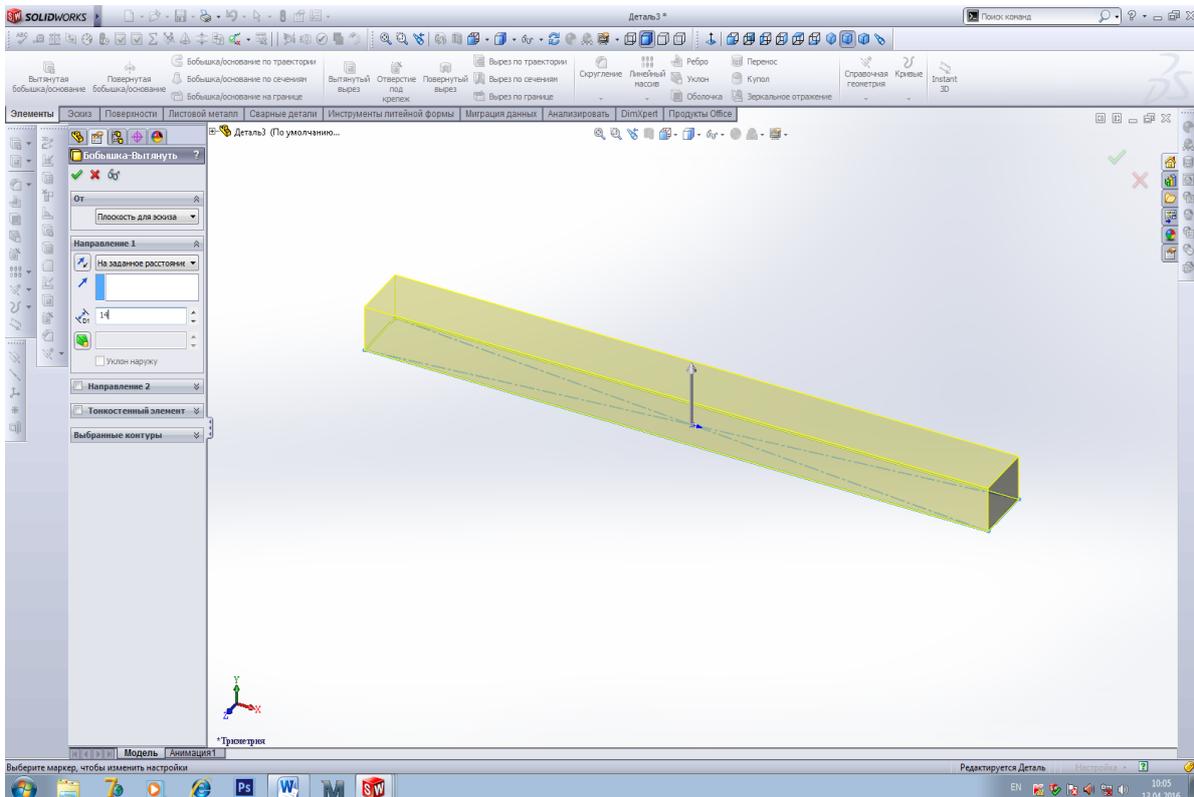


Рис. 5.14

Окончательно сохраняют полученный результат (рис. 5.15).

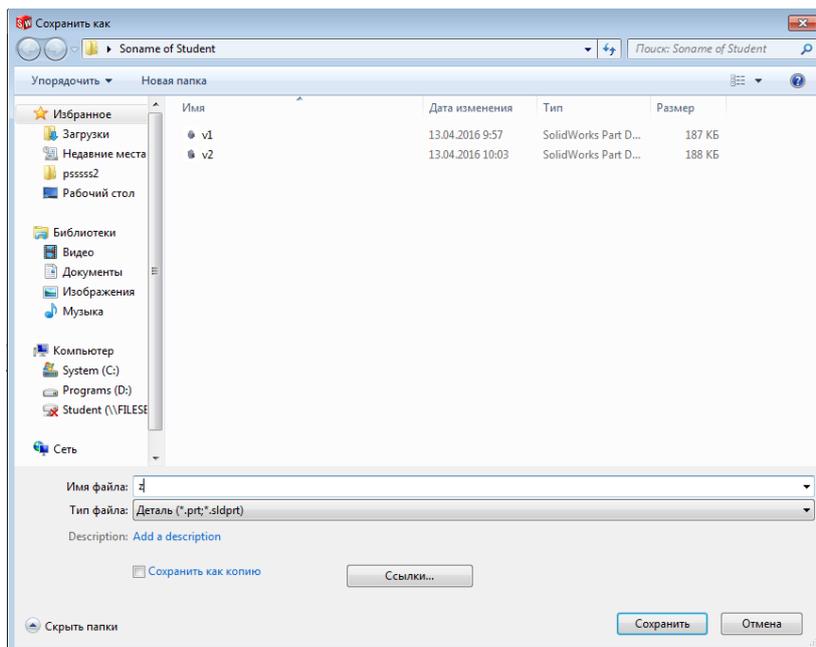


Рис. 5.15

Моделирование матрицы

Для моделирования матрицы создают эскиз с заданными размерами в плоскости сверху (рис. 5.16).

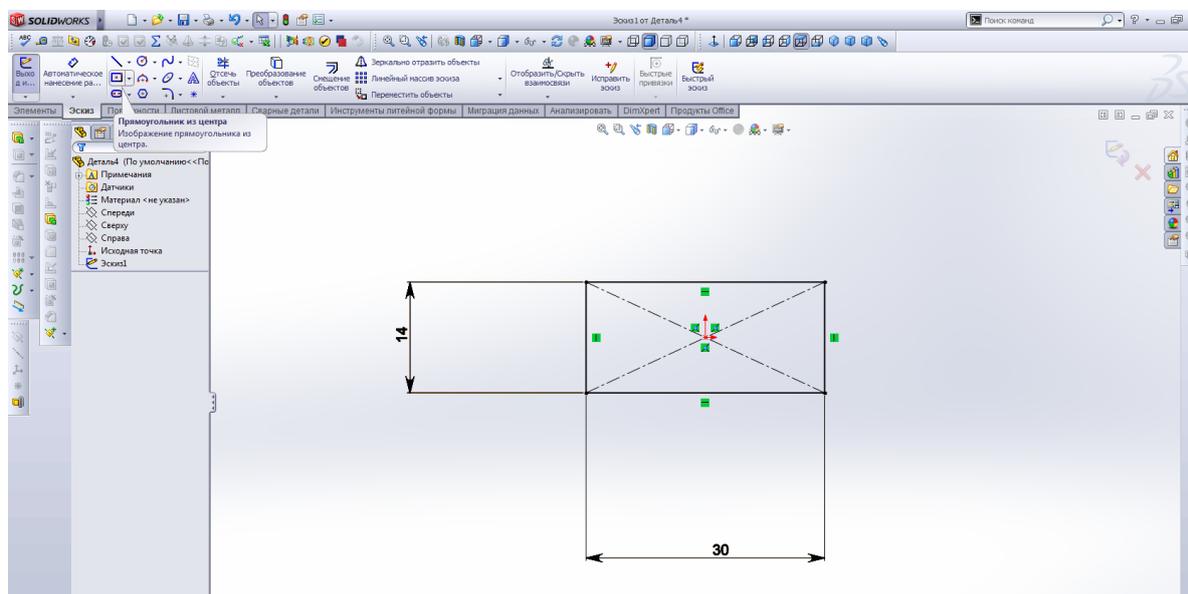


Рис. 5.16

На основе эскиза (рис. 5.17) создают элемент «Вытянутая бобышка» (основание высотой 22 мм).

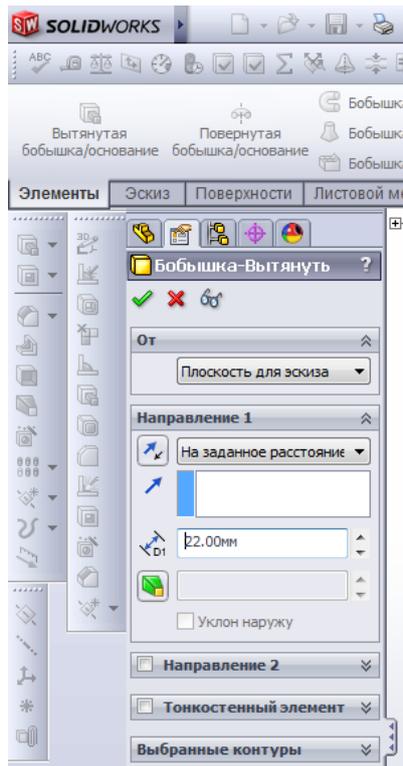


Рис. 5.17

Далее нужно развернуть торцевую плоскость перпендикулярно направлению взгляда, выделить её правой кнопкой мыши и создать эскиз (рис. 5.18, 5.19).

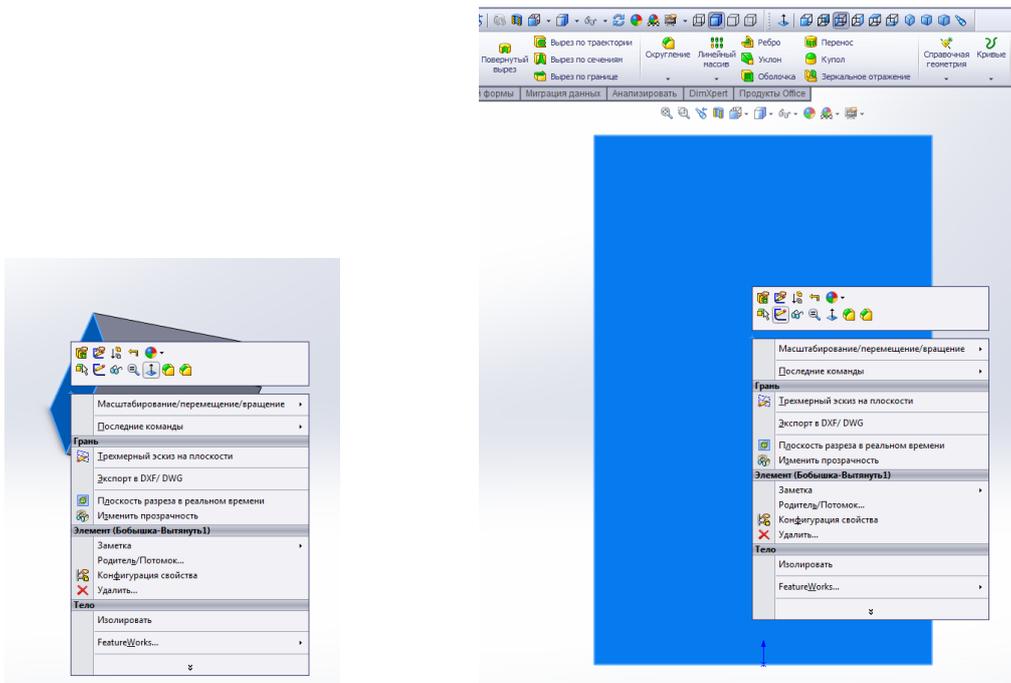


Рис. 5.18

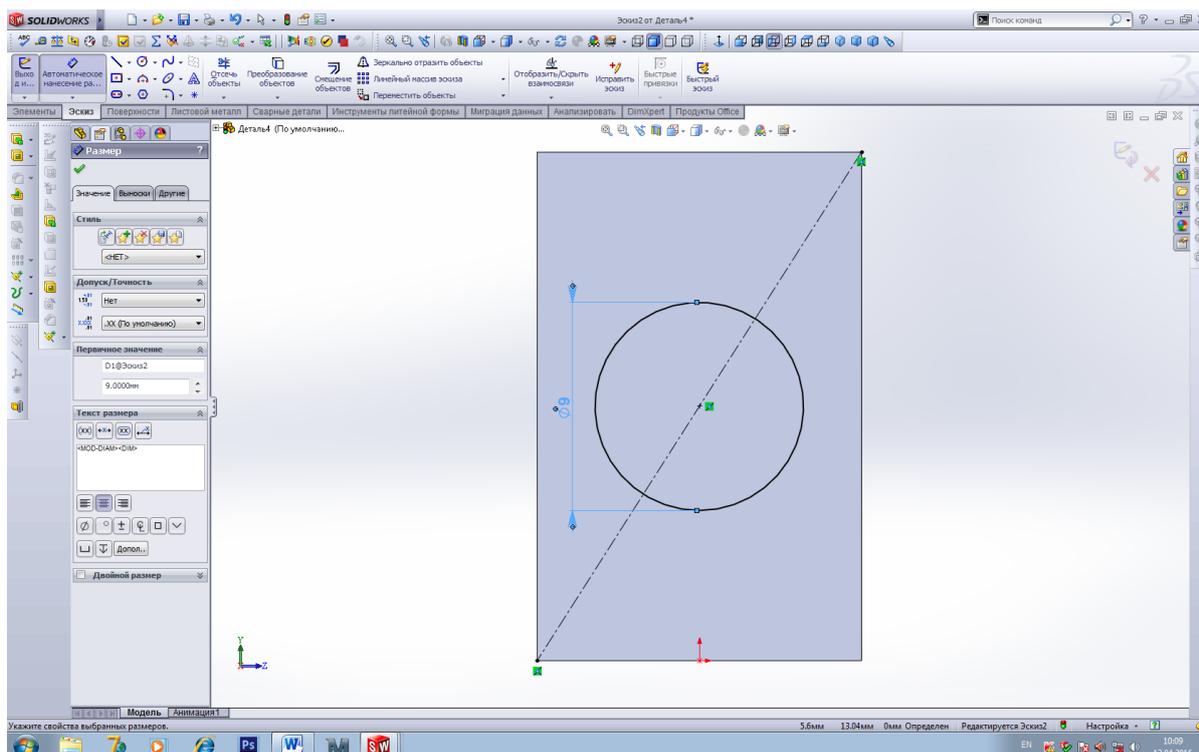


Рис. 5.19

При помощи команды «Вытянутый вырез» в меню элементов создают поясок матрицы длиной 3 мм (рис. 5.20). После этого на дне получившегося углубления создают новый эскиз (рис 5.21).

Для этого эскиза повторяют команду «Вытянутый вырез», установив глубину выреза «Насквозь» (рис. 5.22) и сохраняют полученные результаты.

Сборка модели деформирующего узла

Для осуществления сборки узла создают файл сборки, выбрав соответствующий пункт меню при создании файла (рис. 5.23).

Далее выбирают пункт меню «Вставка компонентов». Нажатием кнопки «Обзор» выпадающего меню с левой стороны экрана выбирают файлы деталей. Компоненты (детали) вставляют в поле сборки (рис. 5.24, 5.25).

Выбирают пункт «Условия сопряжения» в меню «Сборка» и осуществляют сборку узла так, как показано на рис. 5.26–5.36.

Полученные результаты сохраняют в форматах «asm» и «STL» (рис. 5.37, 5.38).

При сохранении сборки в формат STL система выдаст сообщение о количестве сохраненных файлов и на экране появится геометрическая сетка сохраненных объектов (рис. 5.38).

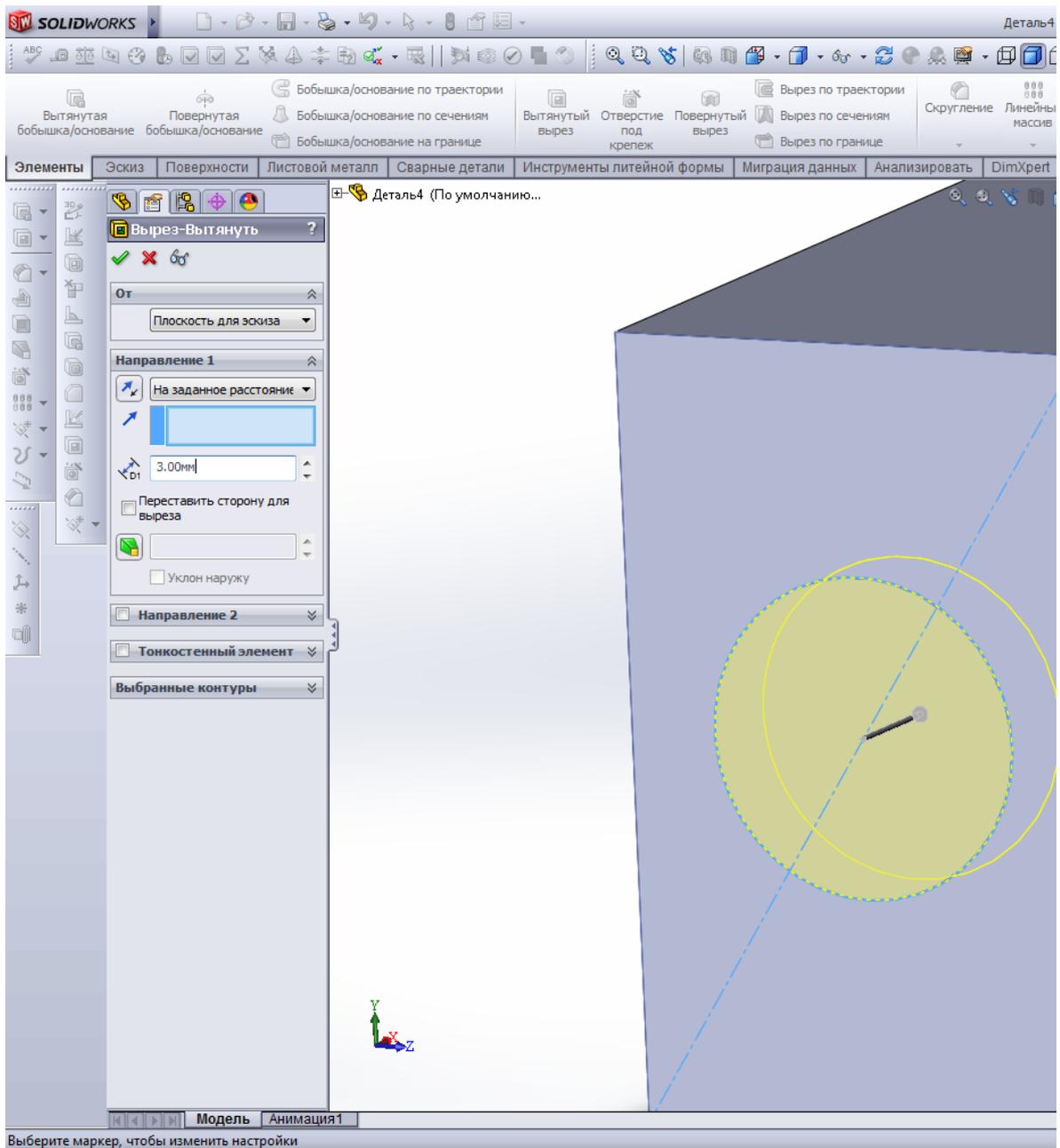
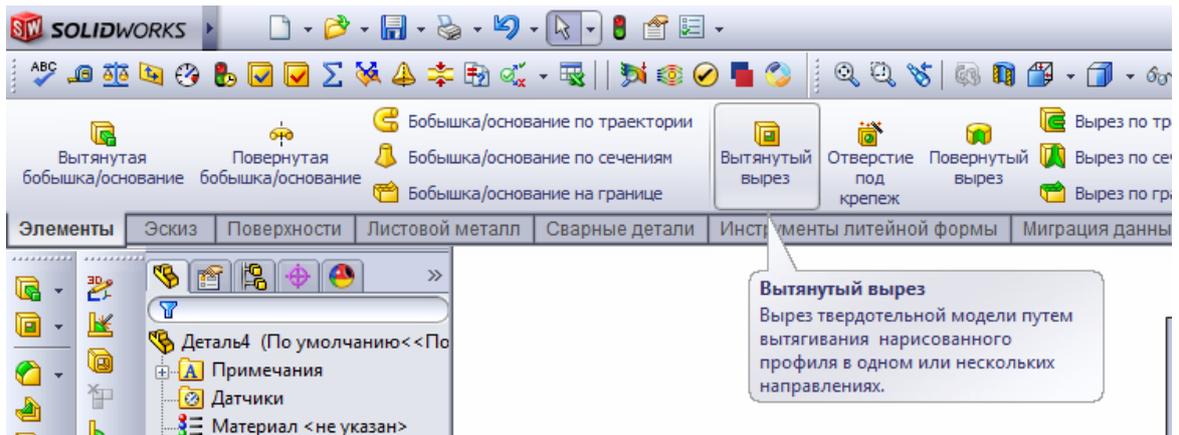


Рис. 5.20

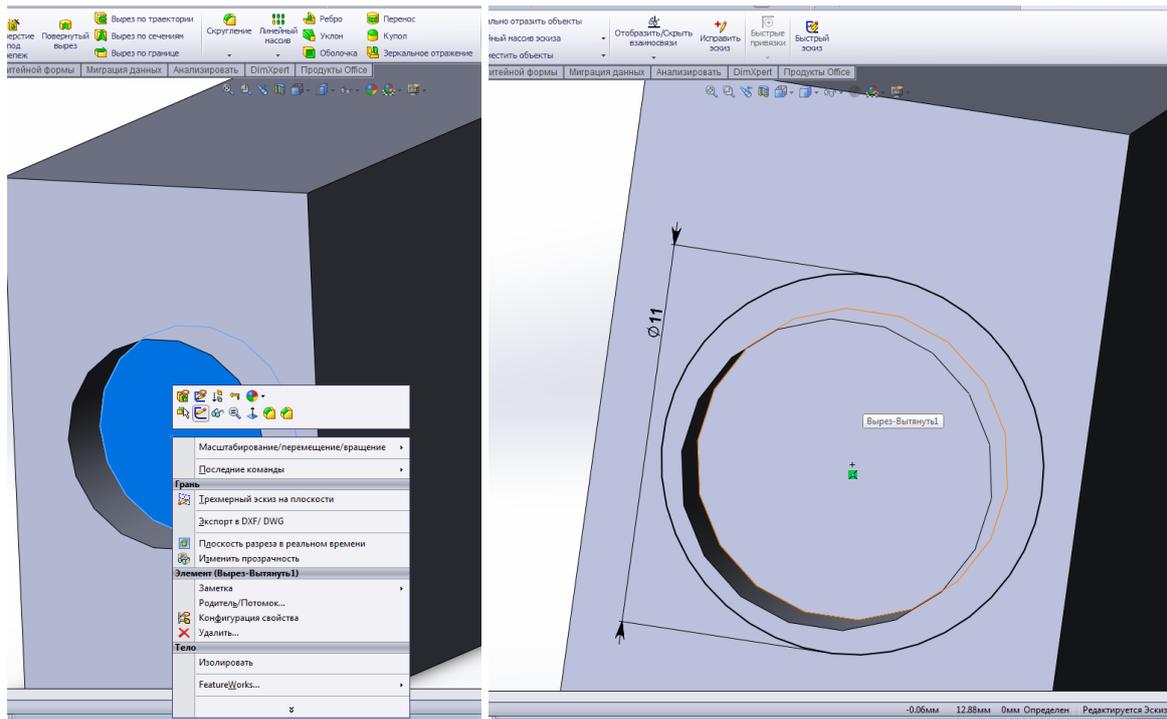


Рис. 5.21

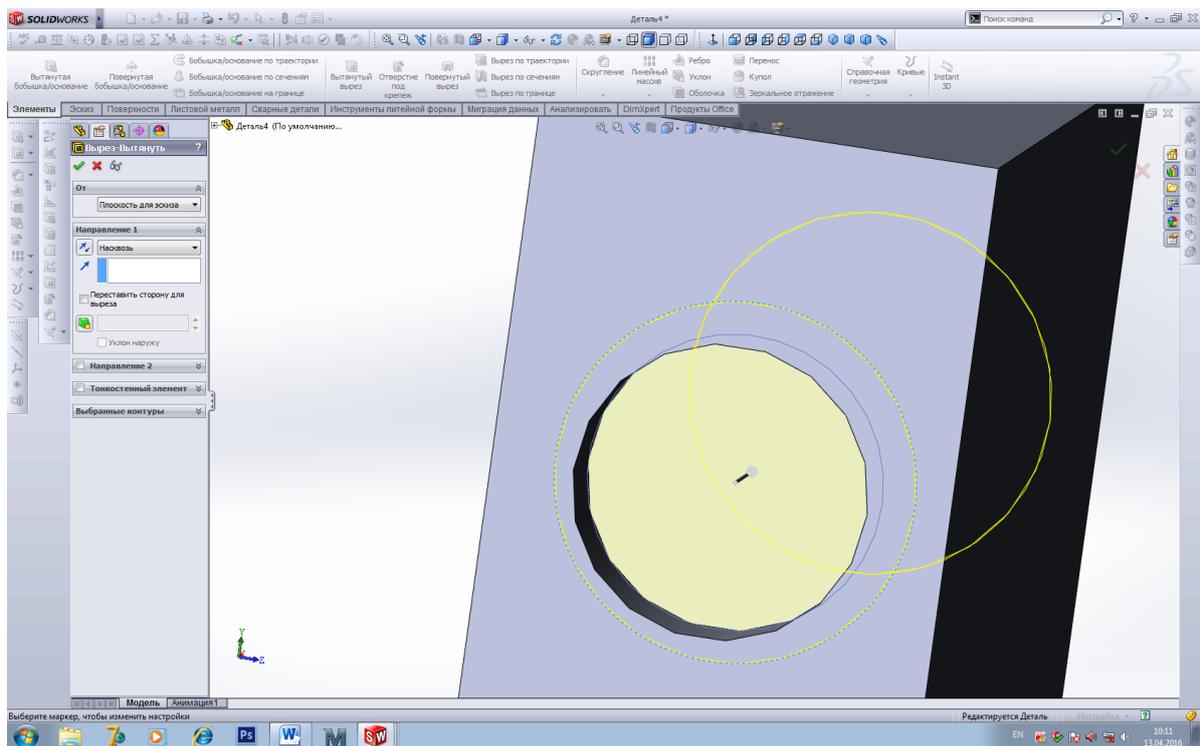


Рис. 5.22

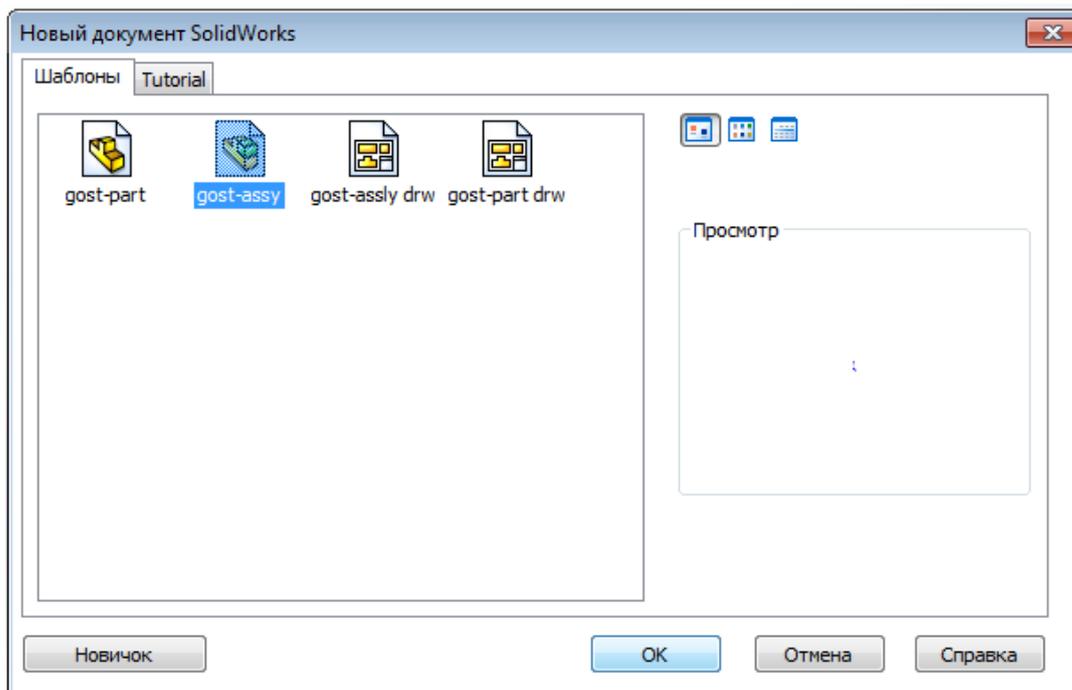


Рис. 5.23

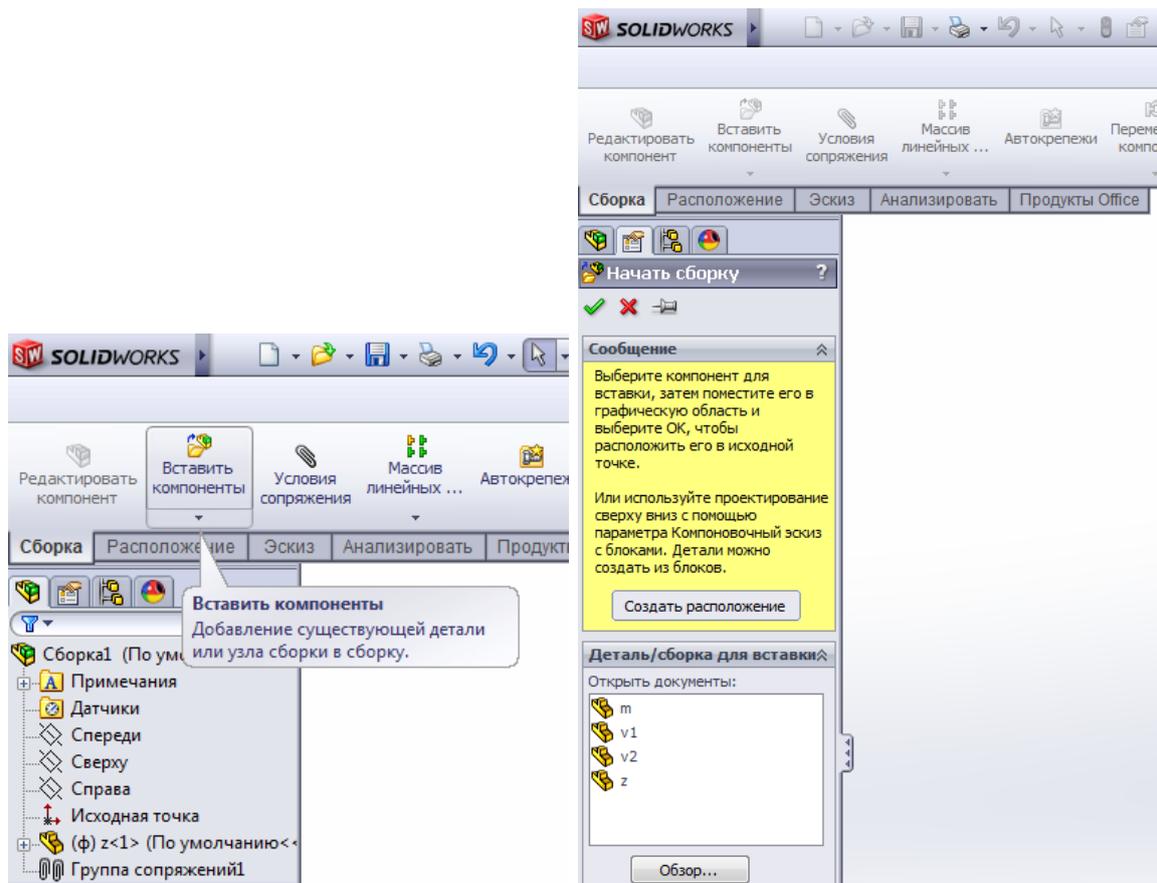


Рис. 5.24

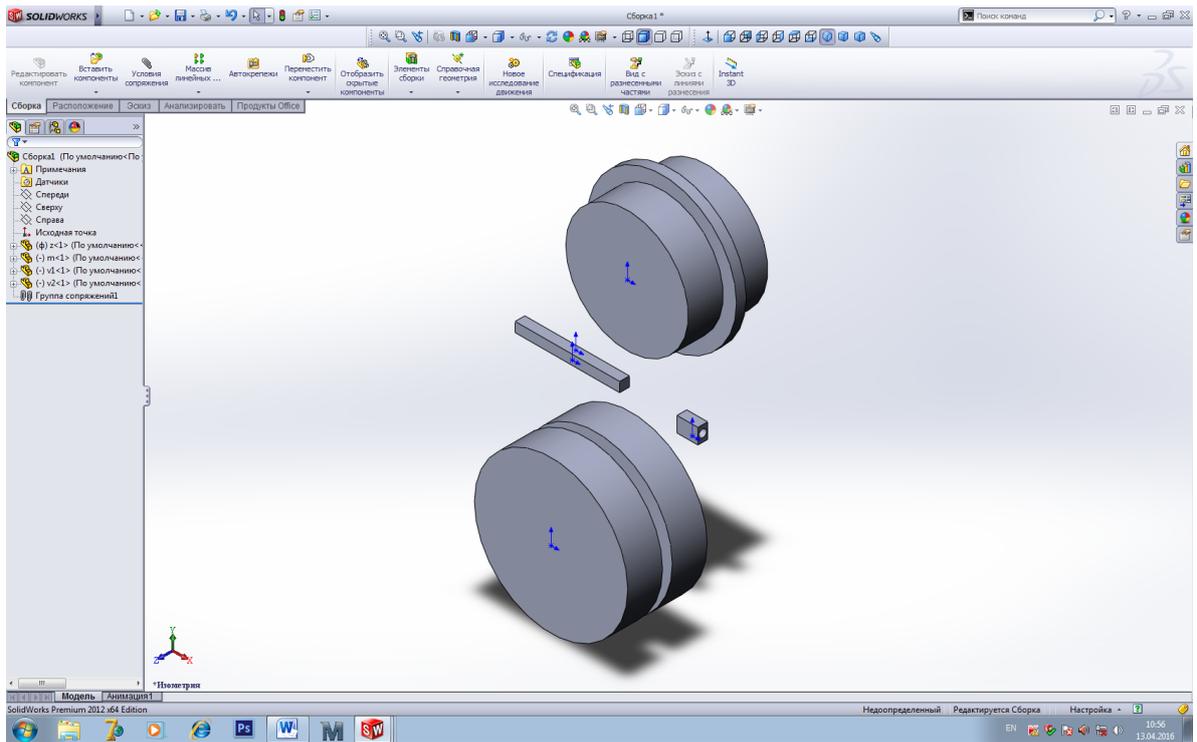


Рис. 5.25

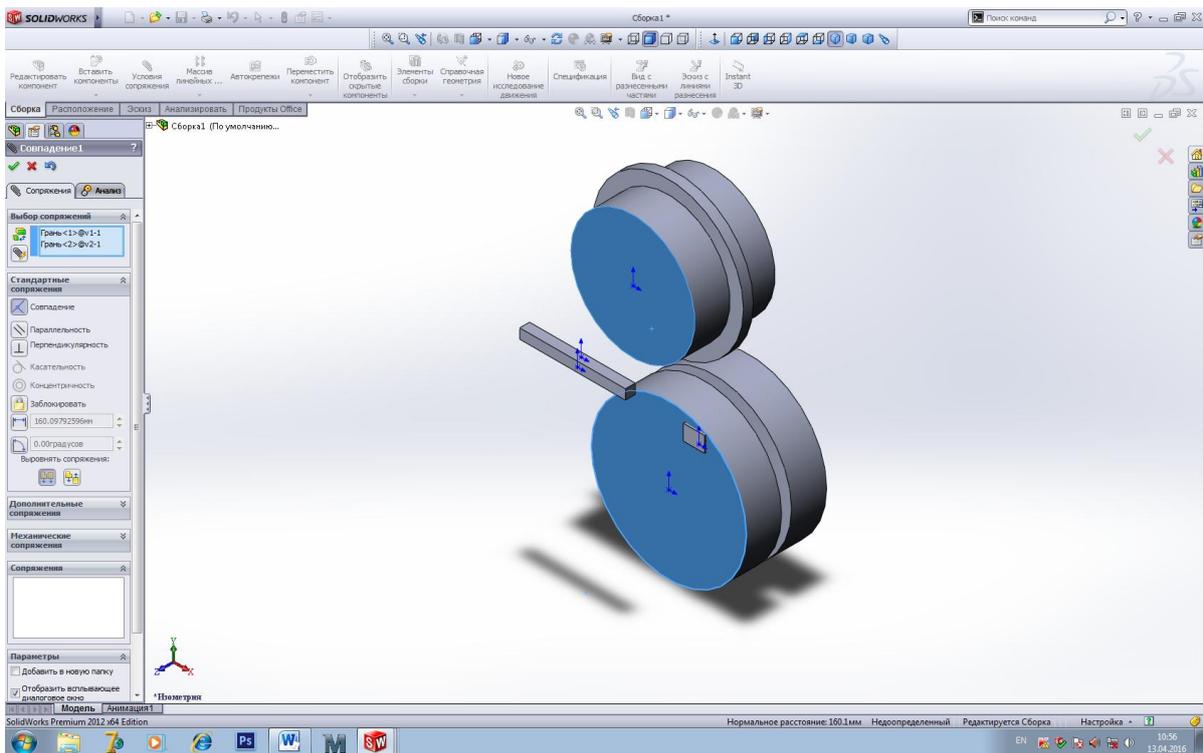


Рис. 5.26

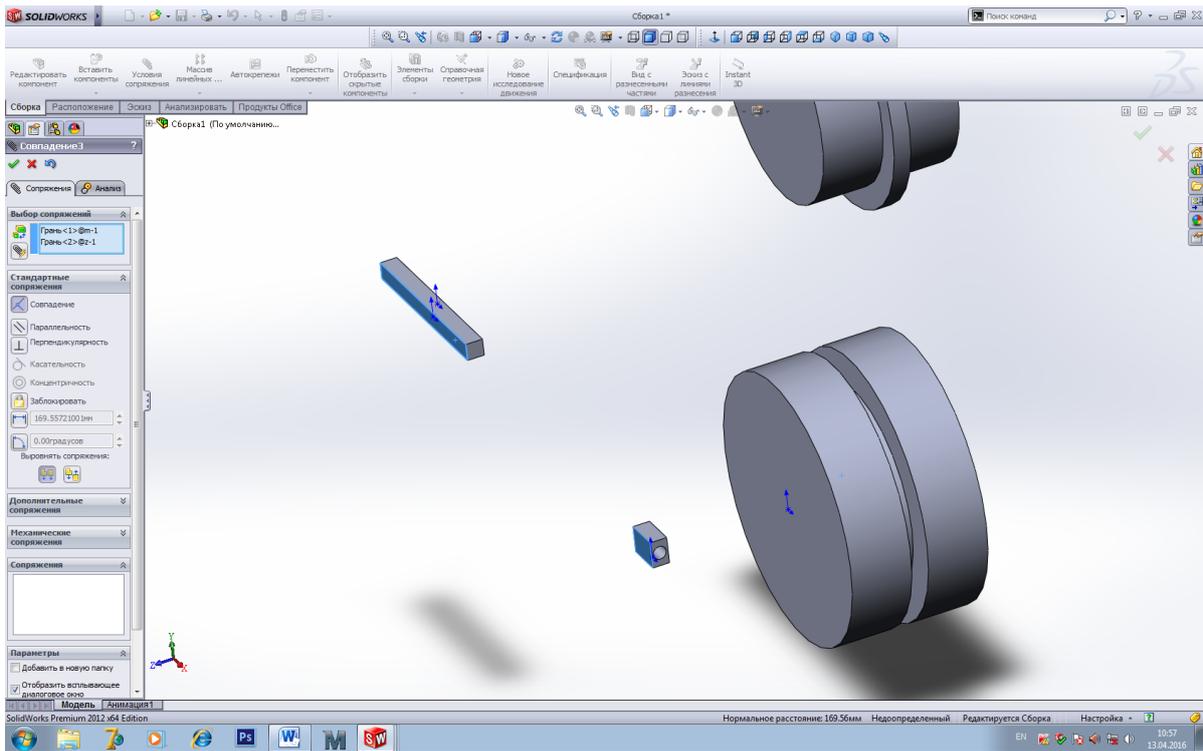


Рис. 5.27

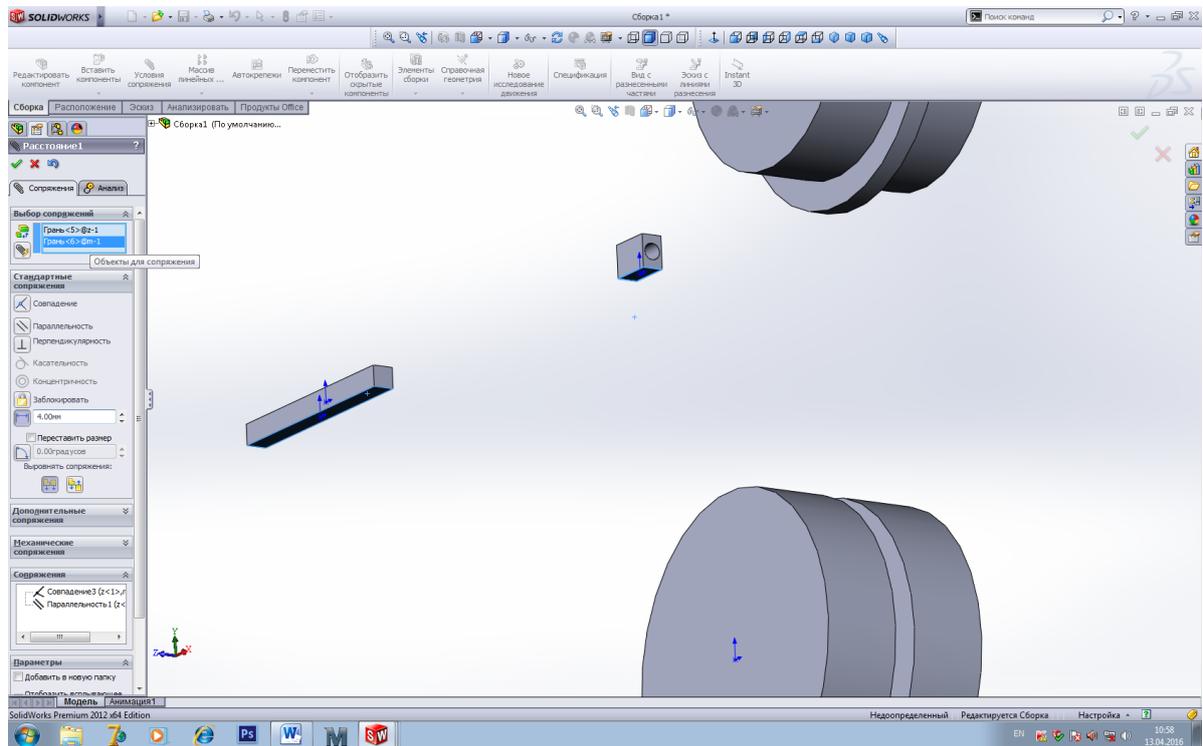


Рис. 5.28

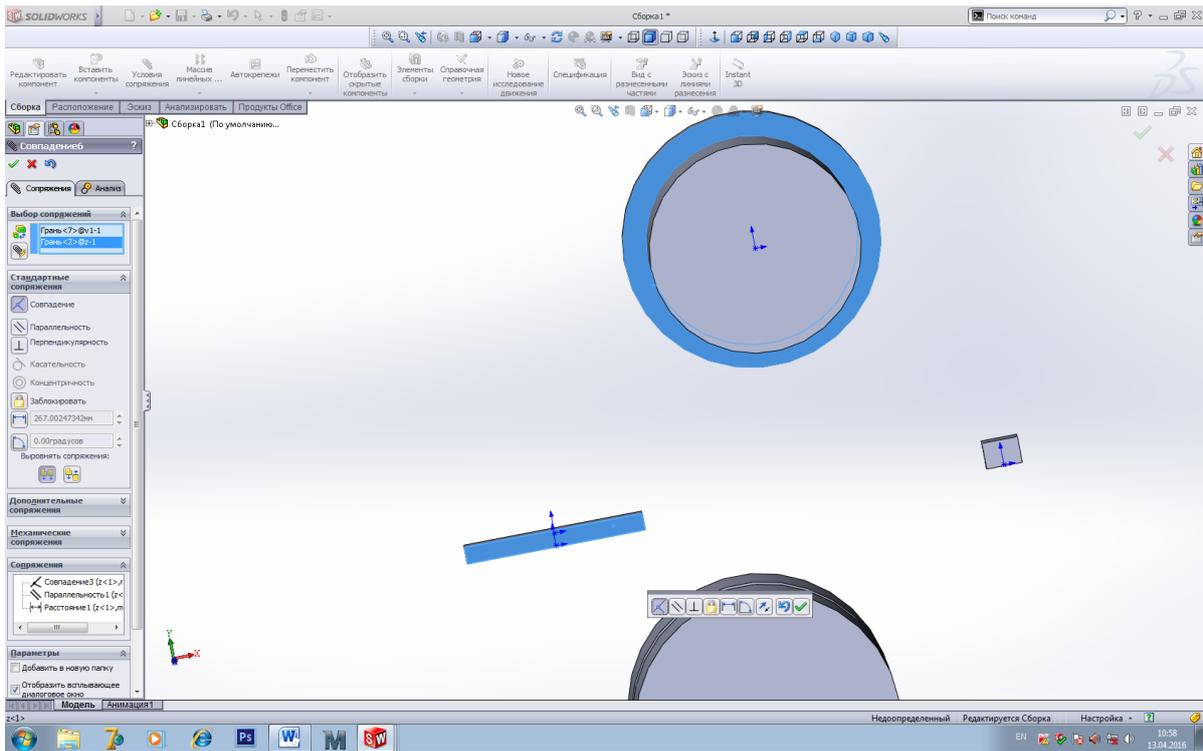


Рис. 5.29

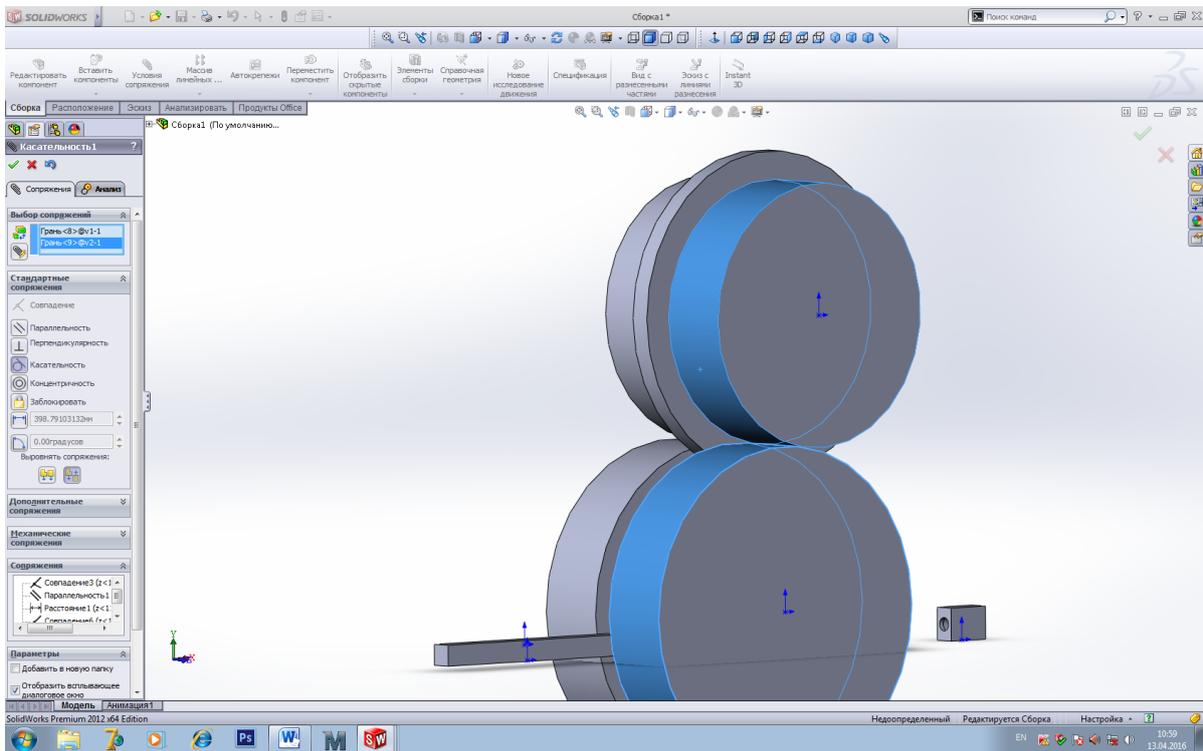


Рис. 5.30

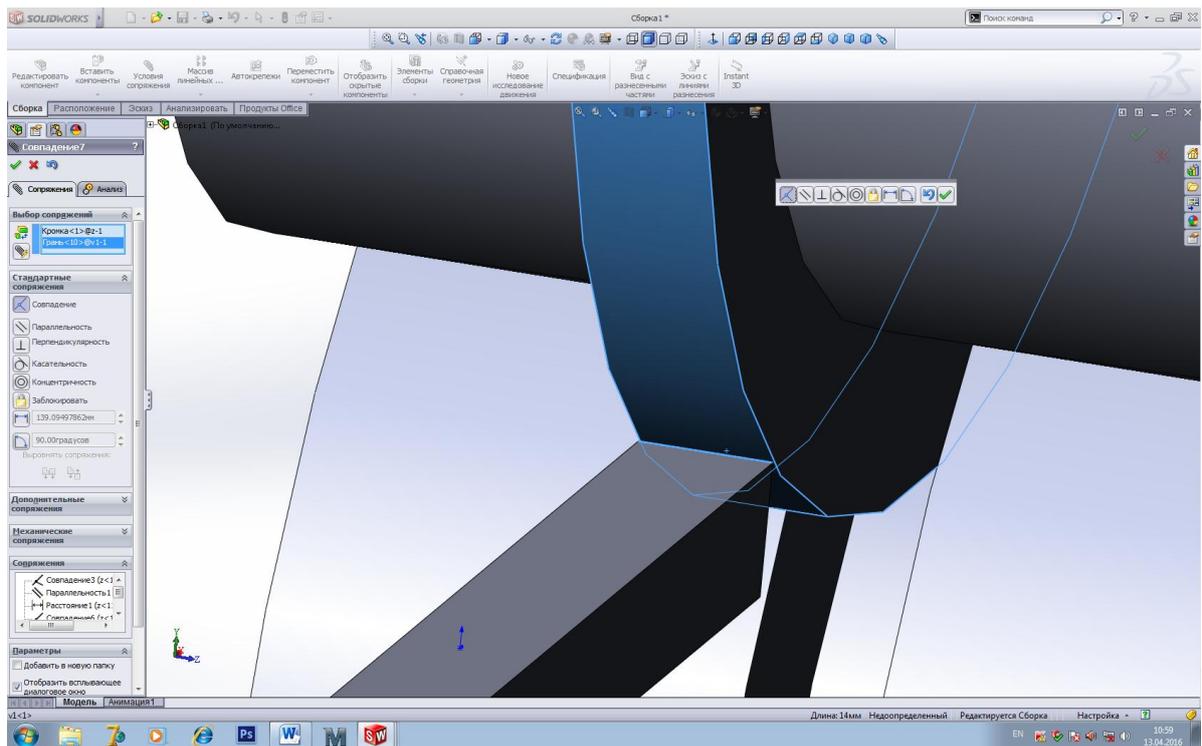


Рис. 5.31

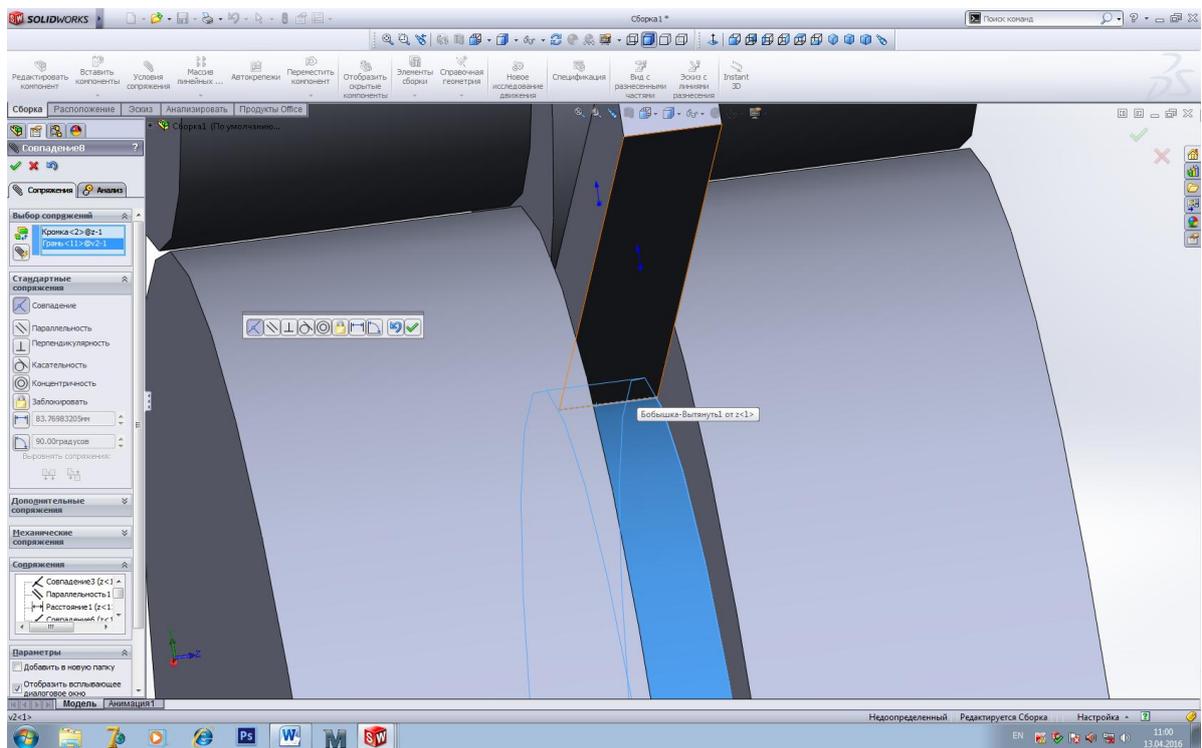


Рис. 5.32

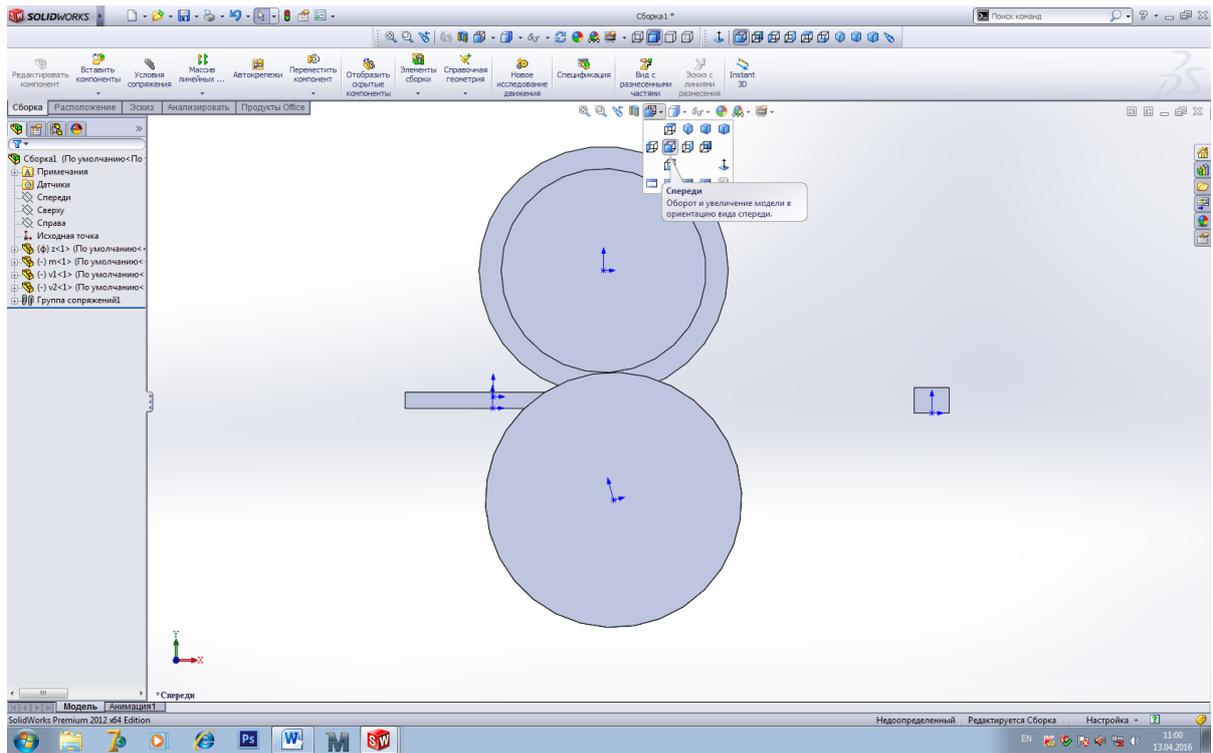


Рис. 5.33

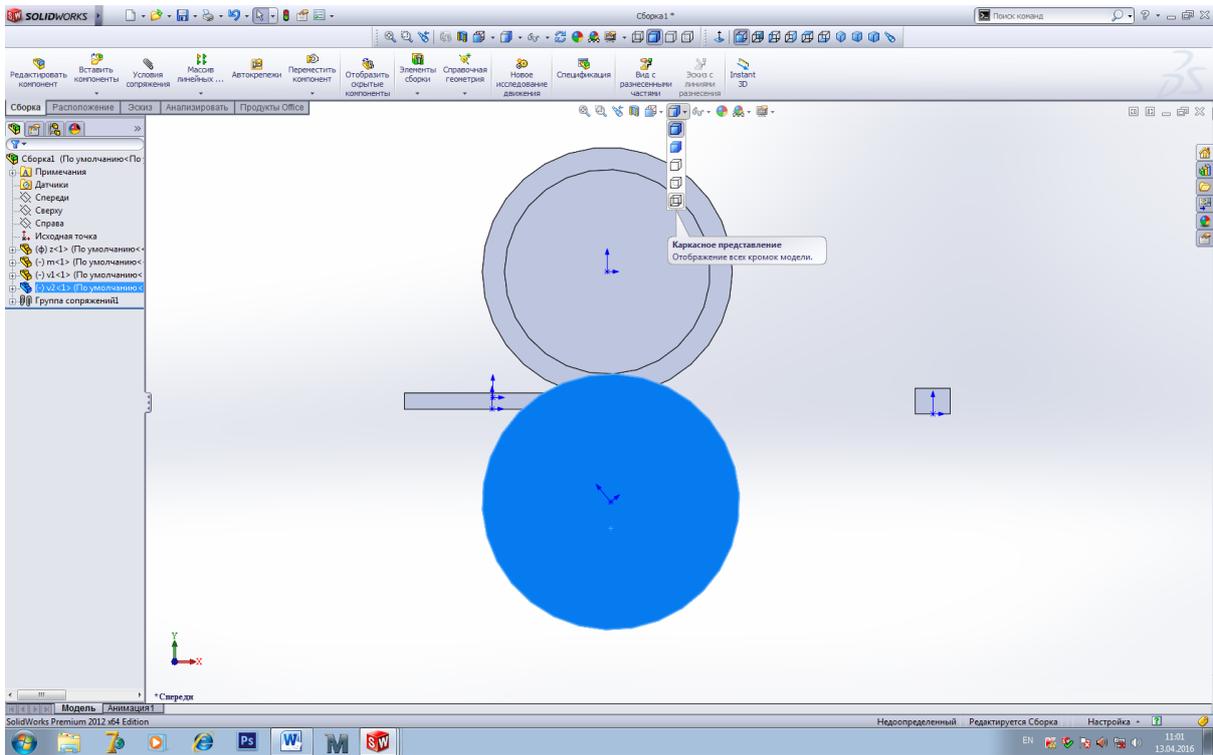


Рис. 5.34

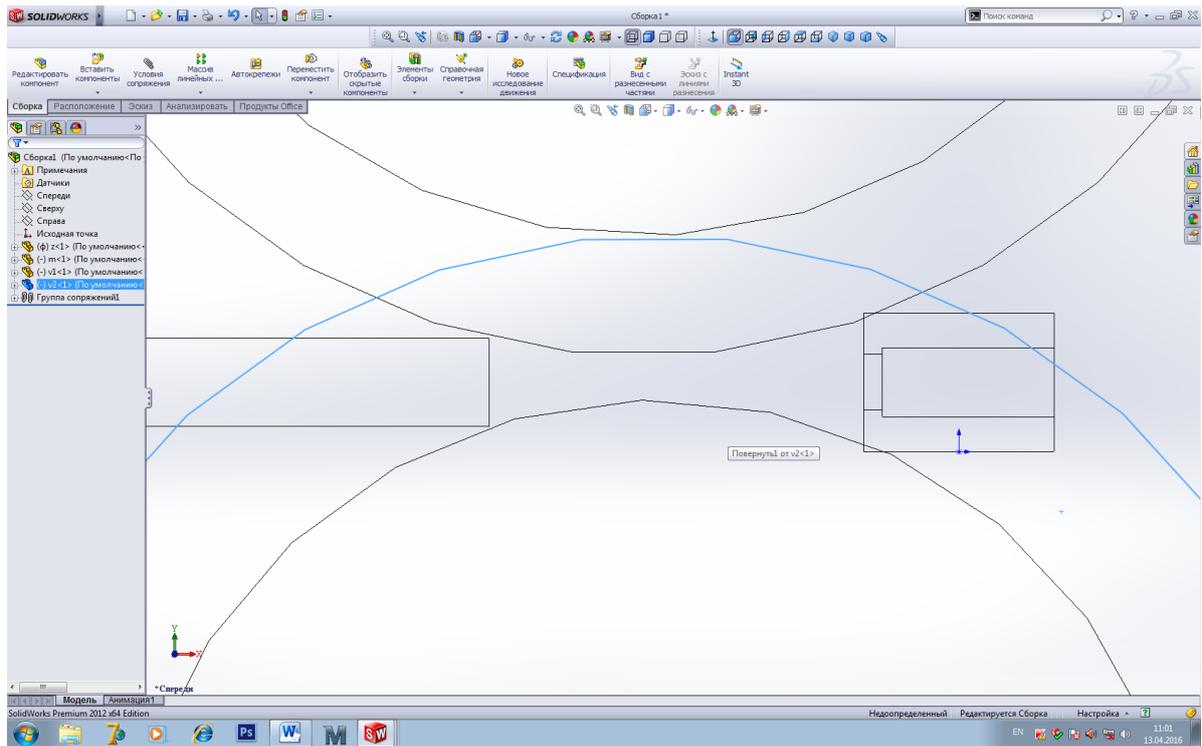


Рис. 5.35

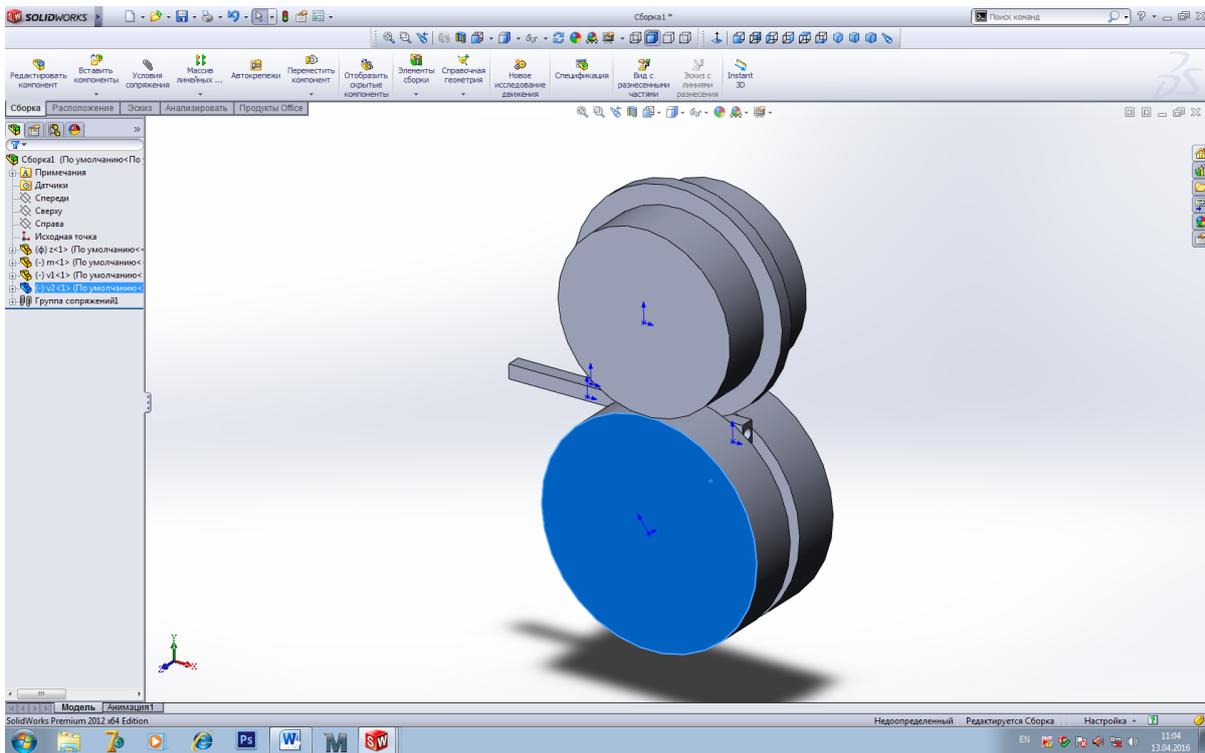


Рис. 5.36

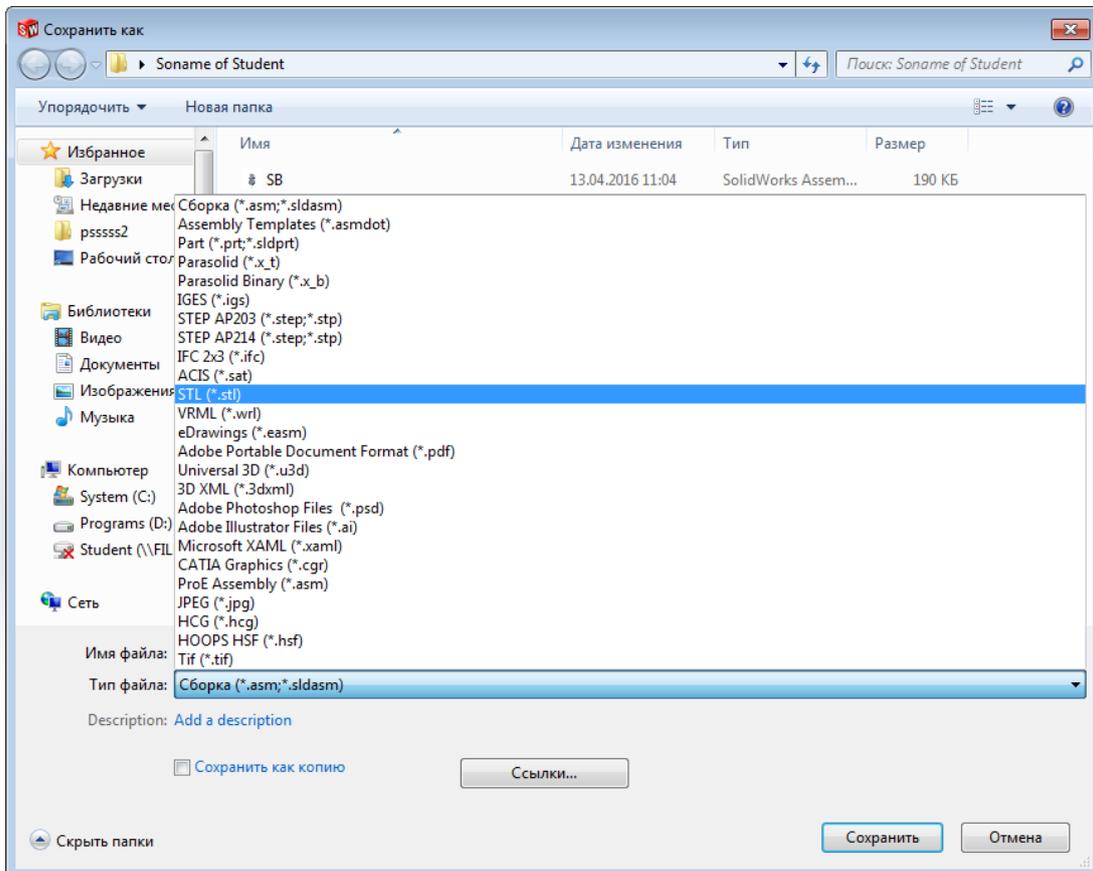
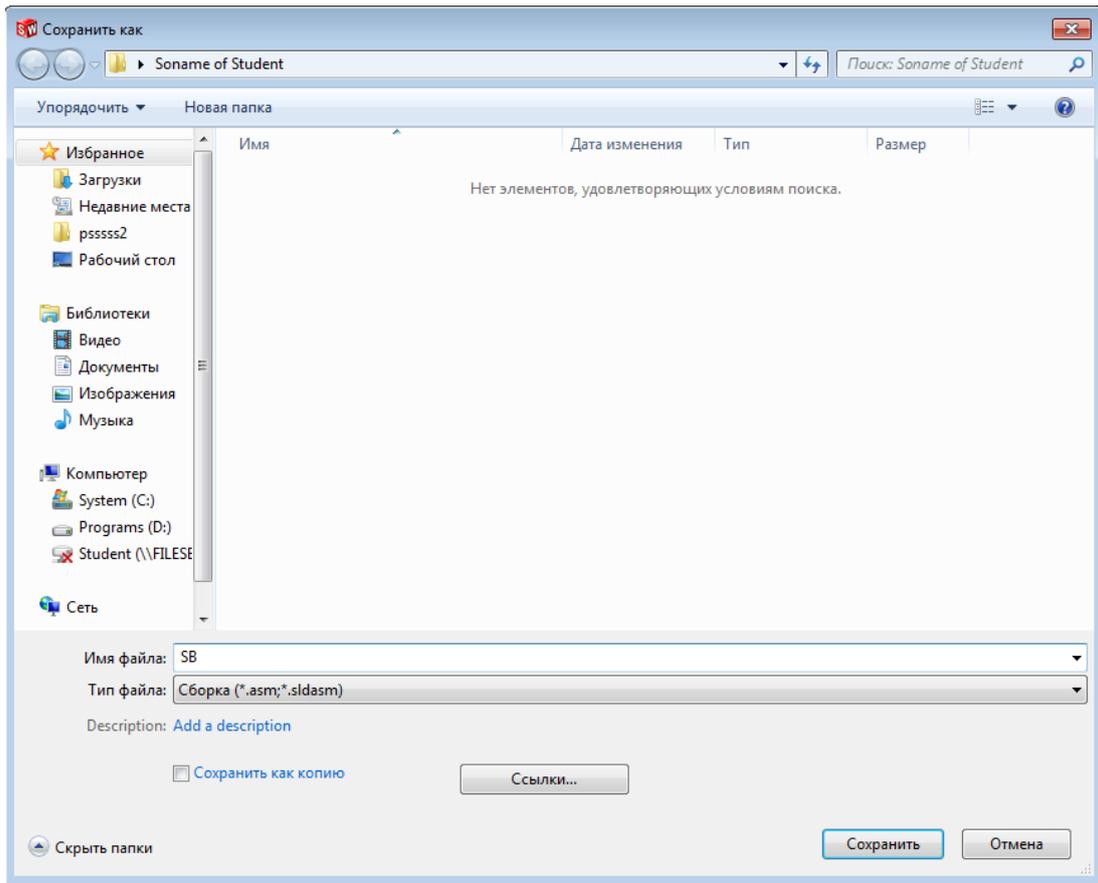


Рис. 5.37

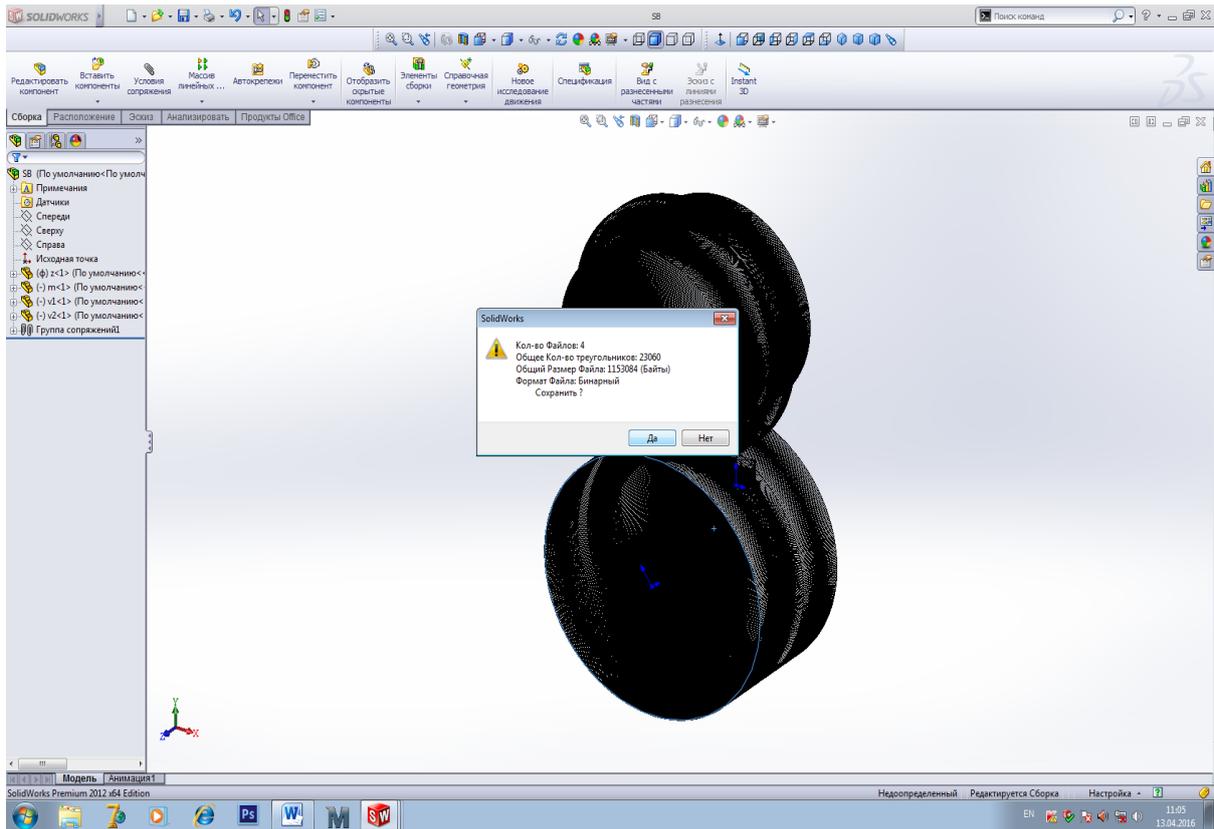


Рис. 5.38

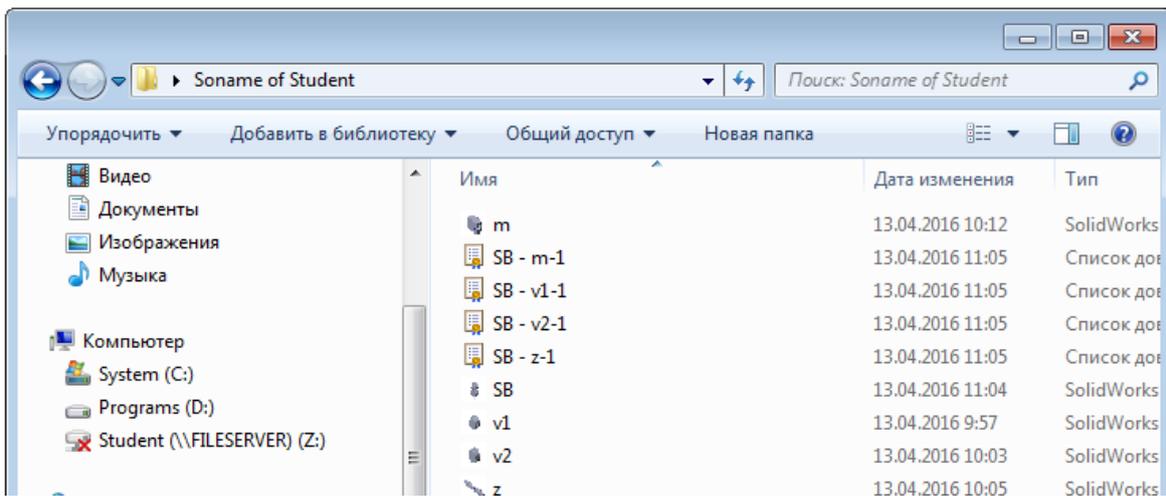


Рис. 5.39

В результате работы должен получиться набор файлов, представленный на рис. 5.39. Данные файлы с названием, написанным латинскими буквами, сохраняют в папке PROBLEM комплекса Deform 3D.

5.2. Проектирование процесса совмещенной прокатки-прессования в программном комплексе Deform 3D

Структура комплекса Deform 3D состоит из трех блоков.

1. Пре. Процессор. В данном блоке производится импорт геометрии инструмента и заготовки, выбор материала, задаются температурно-скоростные параметры процесса и условия контактного трения. Формируется база данных для расчета.

2. Симулятор (Процессор). В данном блоке осуществляется запуск, остановка и прерывание расчета, а также выбор количества ядер процессора, задействованных в ходе моделирования.

3. Пост. Процессор. Блок позволяет вывести на экран, распечатать и сохранить результаты моделирования. Основное окно программы представлено на рис. 5.40.

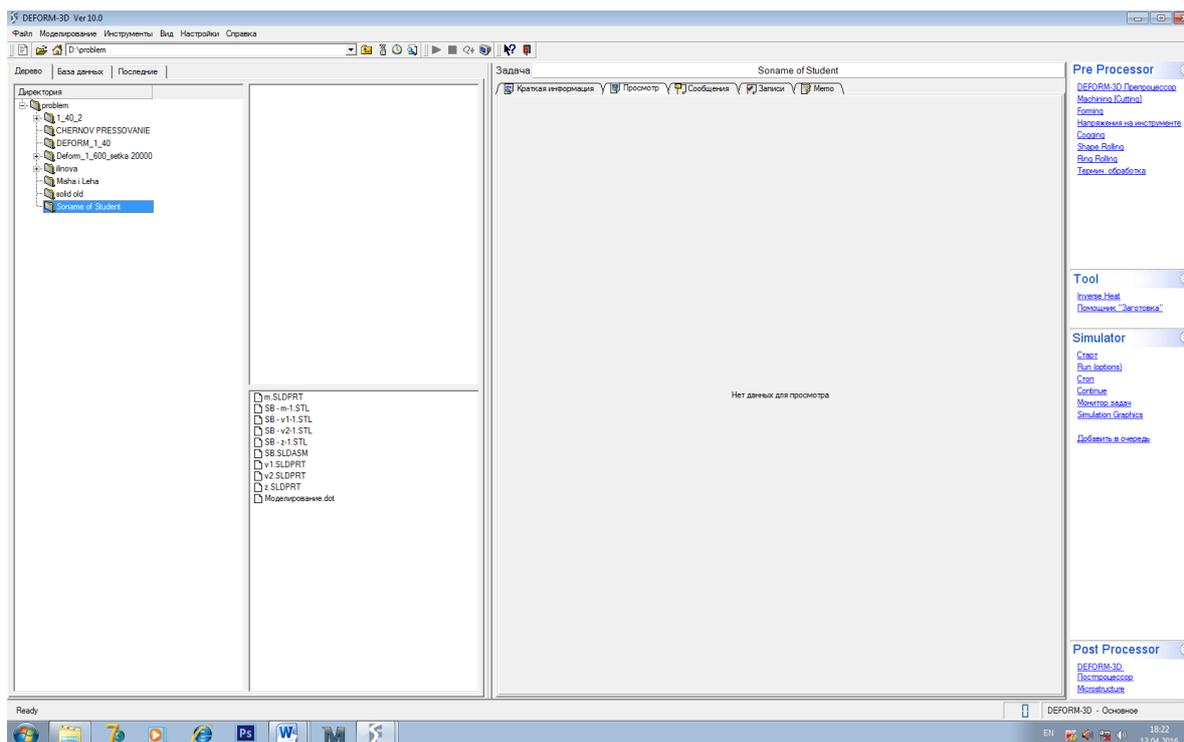
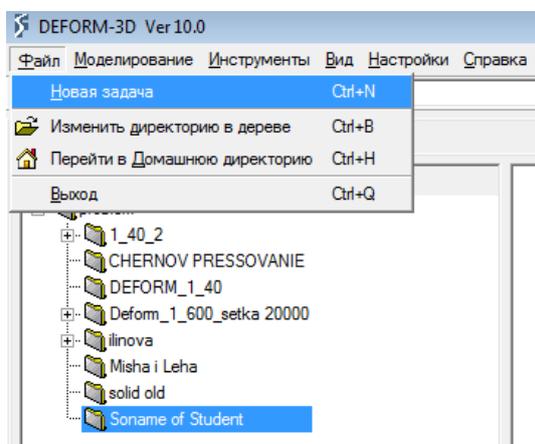


Рис. 5.40

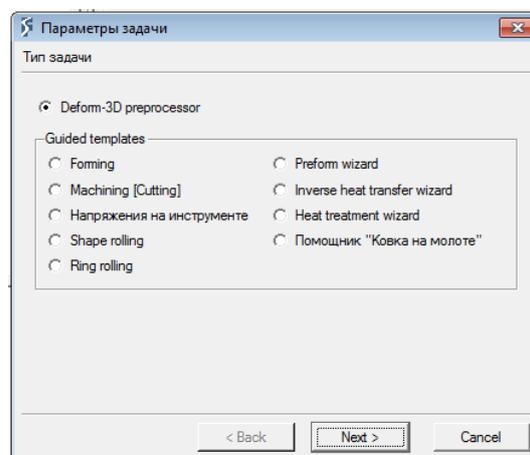
Перед моделированием копируют папку с STL-файлами инструмента и заготовки в рабочую папку «Problem» комплекса Deform и создают новую задачу, как показано на рис. 5.41, 5.42.

После нажатия кнопки Finish в рабочей среде Пре. Процессора (рис. 5.43), при помощи кнопки «Добавить объект» (рис. 5.43 а), соз-

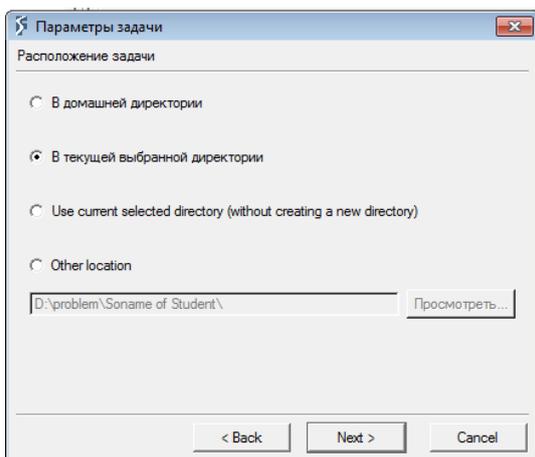
дают объекты для загрузки геометрии инструмента и заготовки (рис. 5.43 б).



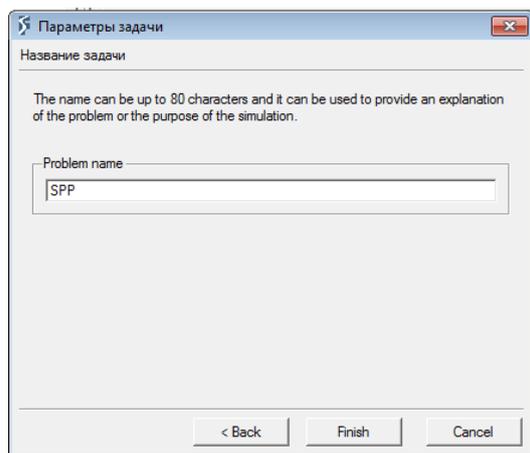
а



б



в



г

Рис. 5.41

При помощи кнопки Импорт геометрии на вкладке «Геометрия» (рис. 5.44, 5.45) загружают STL-модели инструмента и заготовки. При этом на вкладке общих настроек для заготовки выбирают тип объекта «Пластичный», а для инструмента – «Жесткий».

Заготовку разбивают на конечные элементы. Для этого во вкладке «Сетка» указывают число элементов от 3 000 до 10 000; нажимают кнопки «Генерация» и «Проверить сетку» (рис. 5.46).

Задают температуры заготовки и инструмента на вкладках «Общие» для каждого объекта (рис. 5.47).

Материал заготовки выбирают из базы данных программного комплекса на вкладке «Общие» (рис. 5.48), а параметры движения инструмента – на вкладке «Движение» (рис. 5.49). Нажатием на кнопку

«Simulation Controls» вызывают меню ввода параметров расчета (рис. 5.50). В появившемся окне на вкладке «Основные» ставят галочку напротив пункта «Теплопередача», как показано на рисунке.

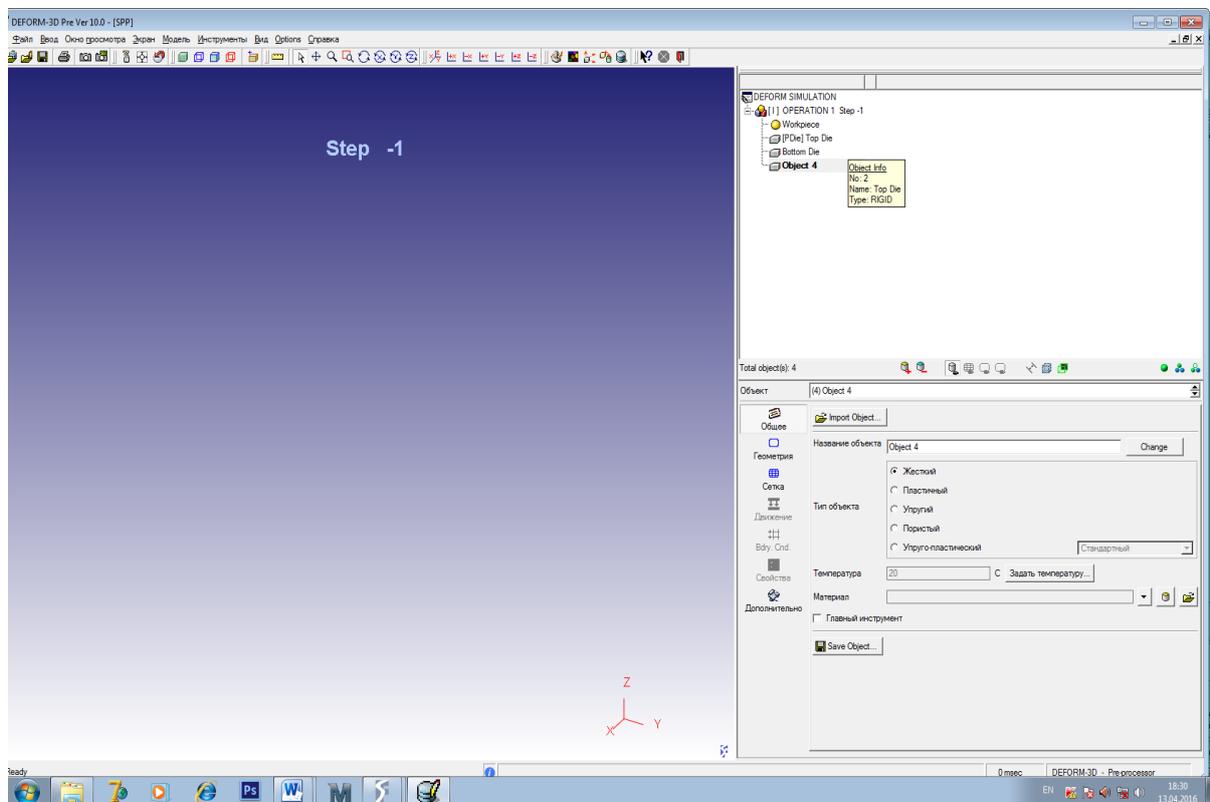


Рис. 5.42

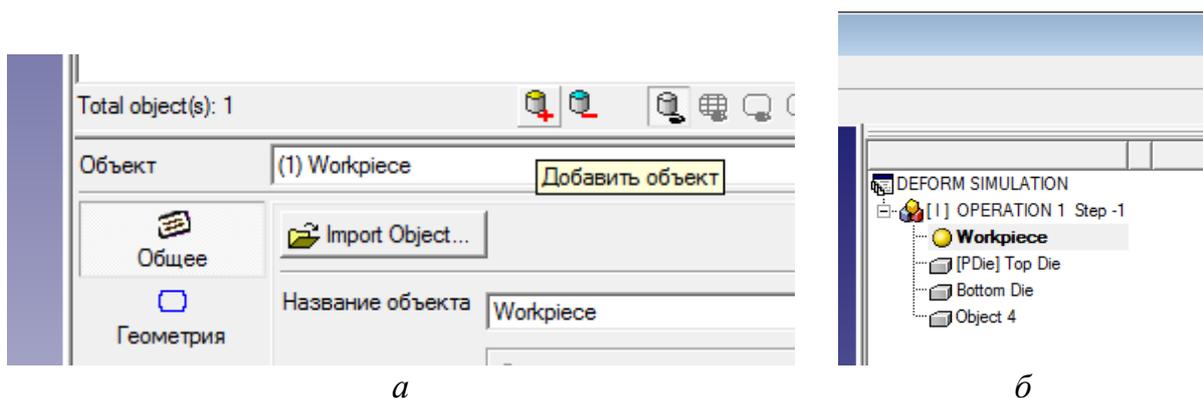


Рис. 5.43

При помощи кнопки «Inter Object» вызывают меню «Взаимодействие объектов» (рис. 5.51). При этом необходимо согласиться с выбором, когда система предложит автоматически сгенерировать взаимодействие между объектами. Далее необходимо вызвать меню гене-

рации базы данных (рис. 5.52). В появившемся окне следует провести проверку и генерацию базы данных для расчета.

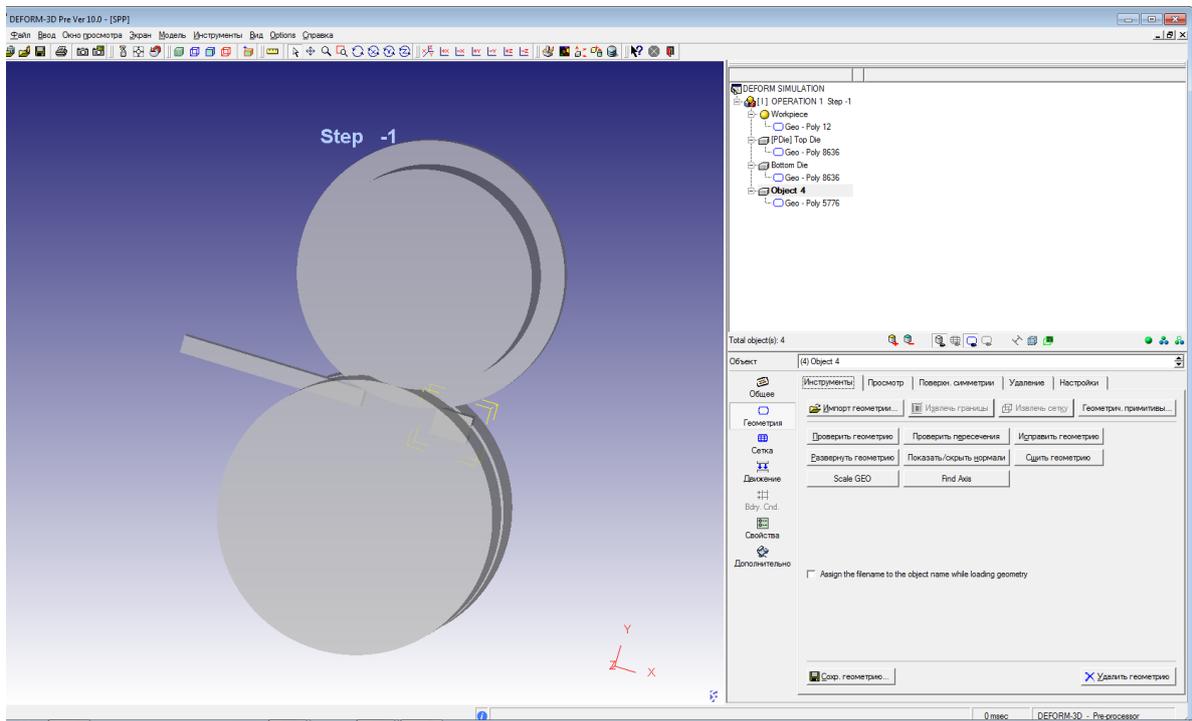


Рис. 5.44

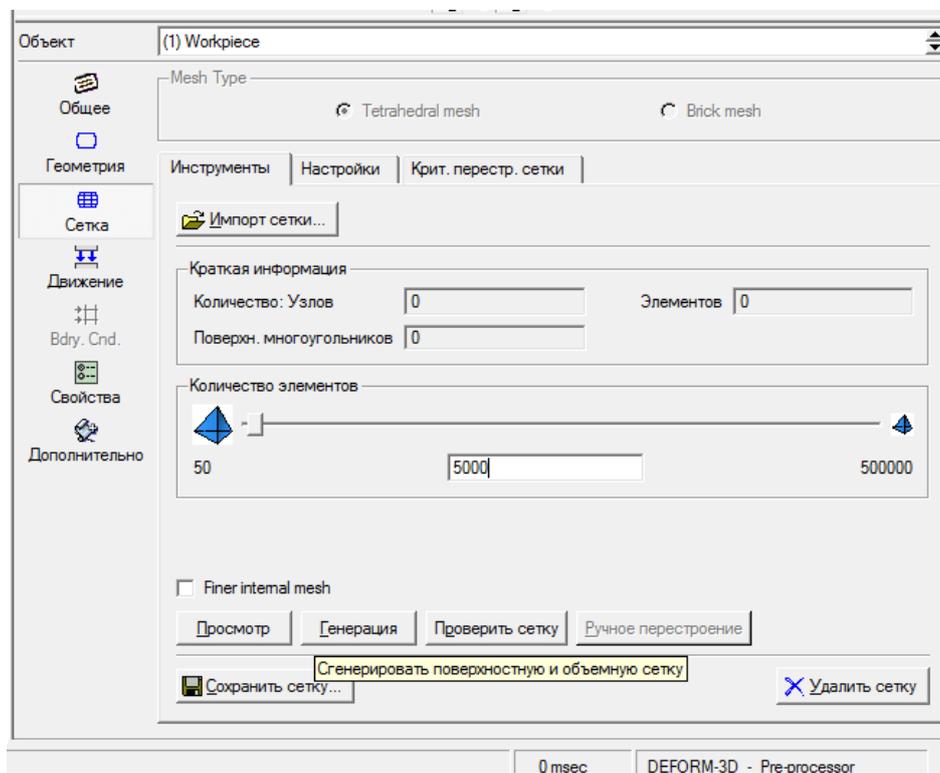


Рис. 5.45

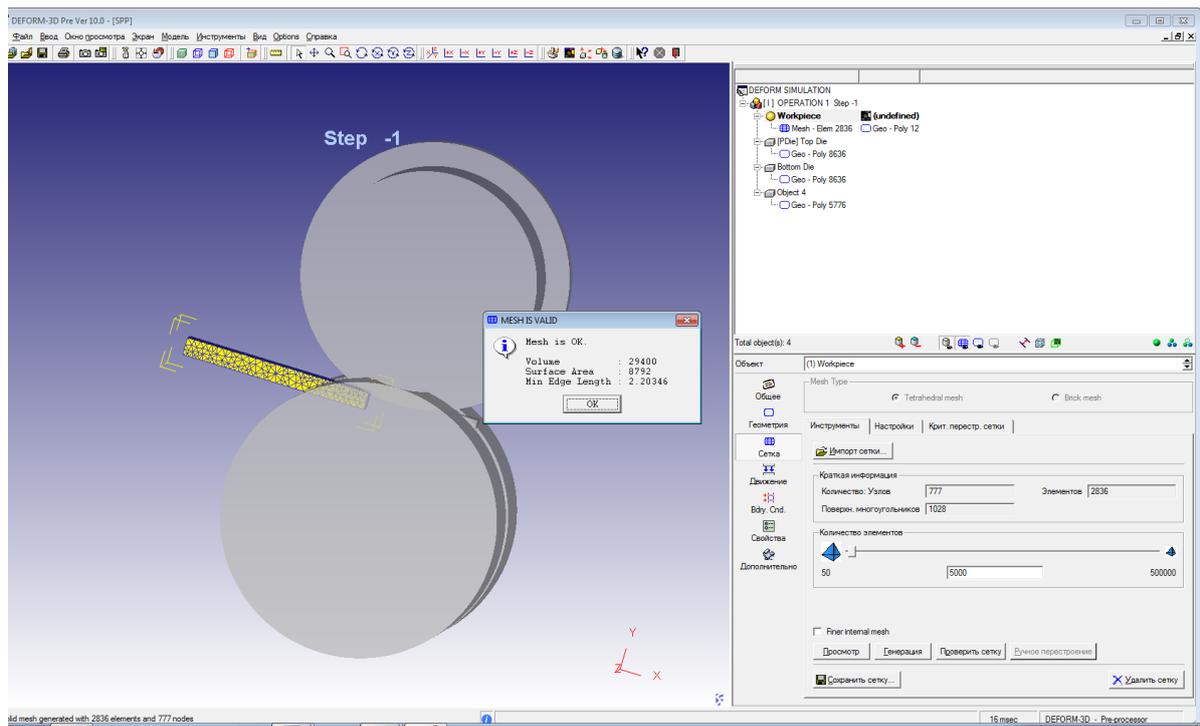


Рис. 5.46

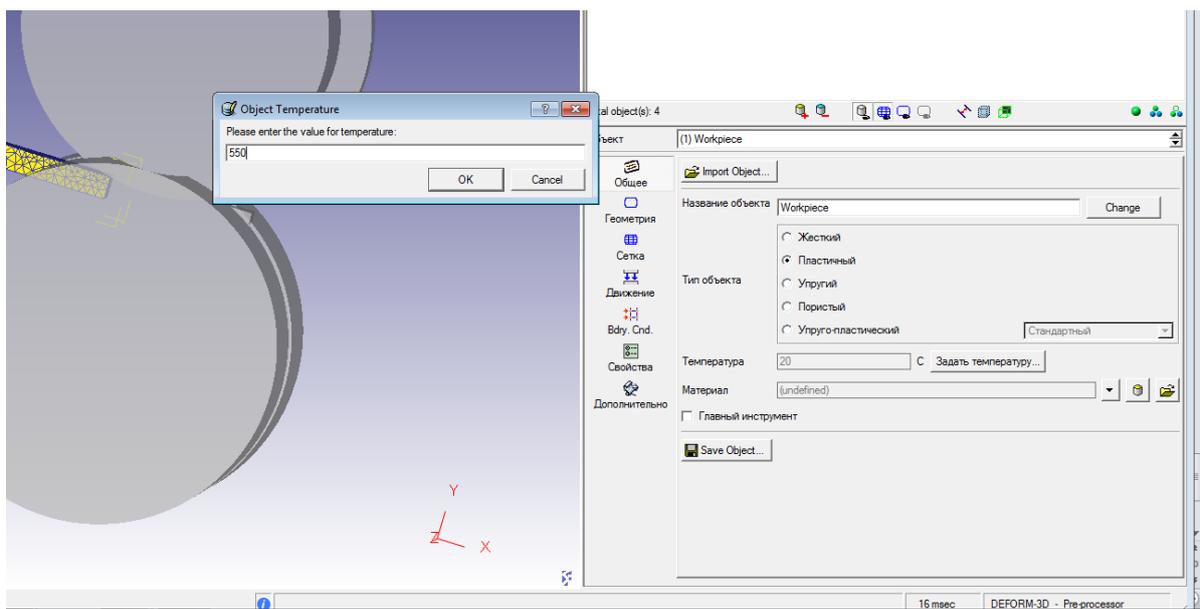


Рис. 5.47

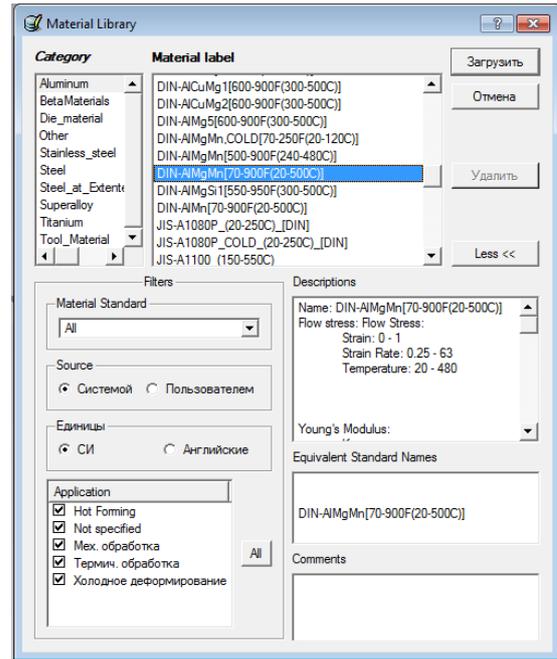
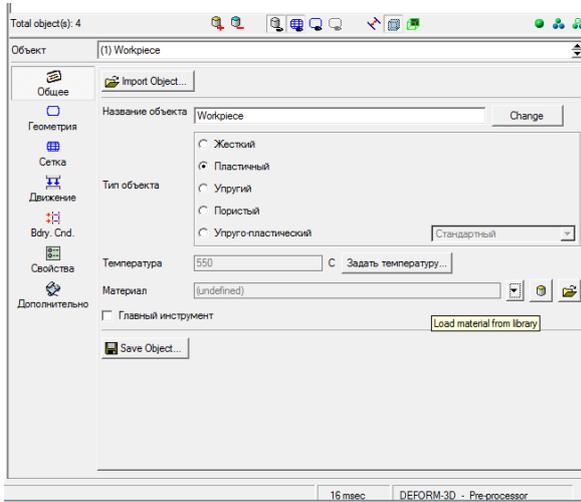


Рис. 5.48



Рис. 5.49

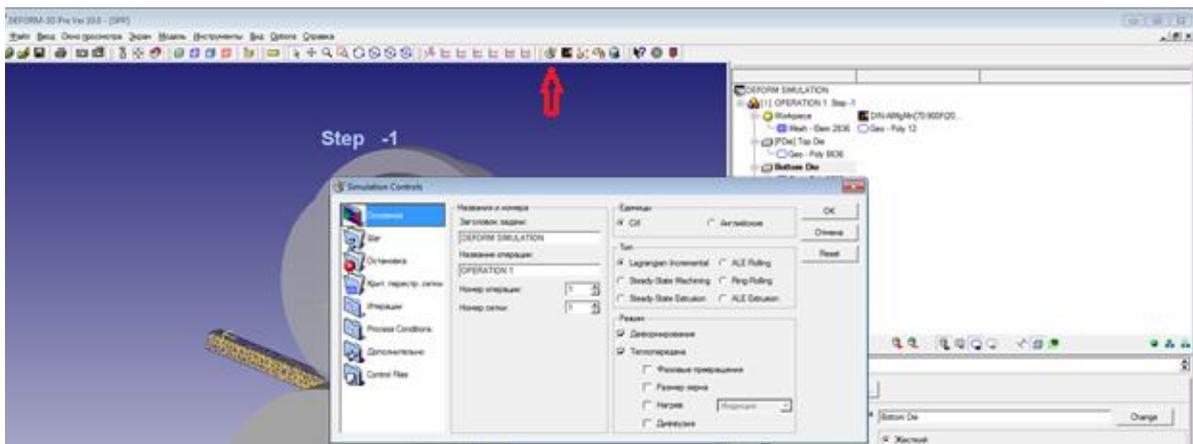


Рис. 5.50

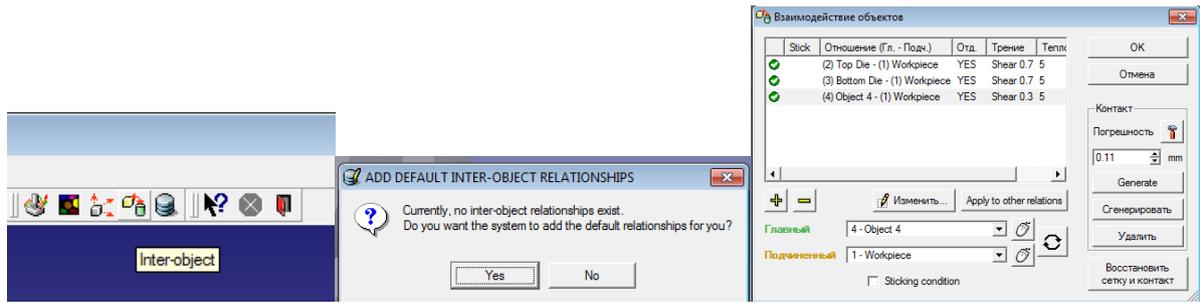


Рис. 5.51

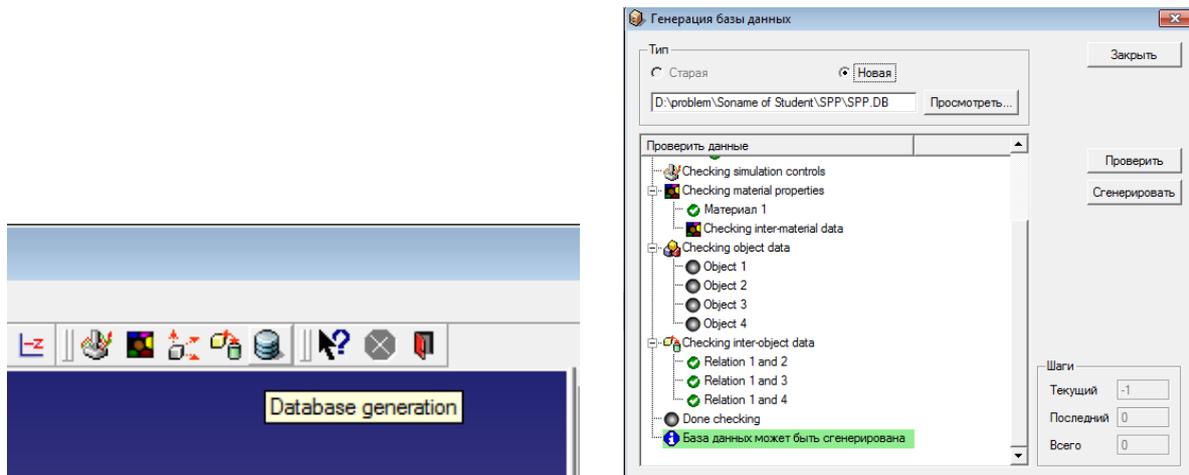


Рис. 5.52

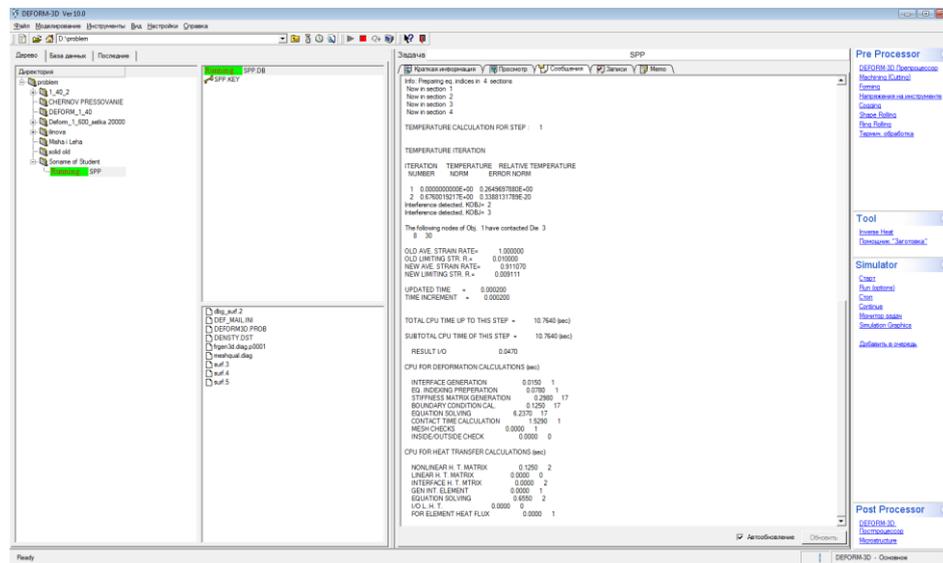


Рис. 5.53

После сохранения базы запускают расчет в основном поле программы (рис. 5.53). После завершения расчета смотрят его результаты в Пост. Процессоре программного комплекса.

5.3. Расчет температуры и напряжений при совмещенной прокатке-прессовании

Для практического применения предлагается провести моделирование процесса СПП для сплава АД31 в соответствии с вариантами заданий в табл. 5.1. Схема для моделирования процесса с обозначением размеров представлена на рис. 5.54.

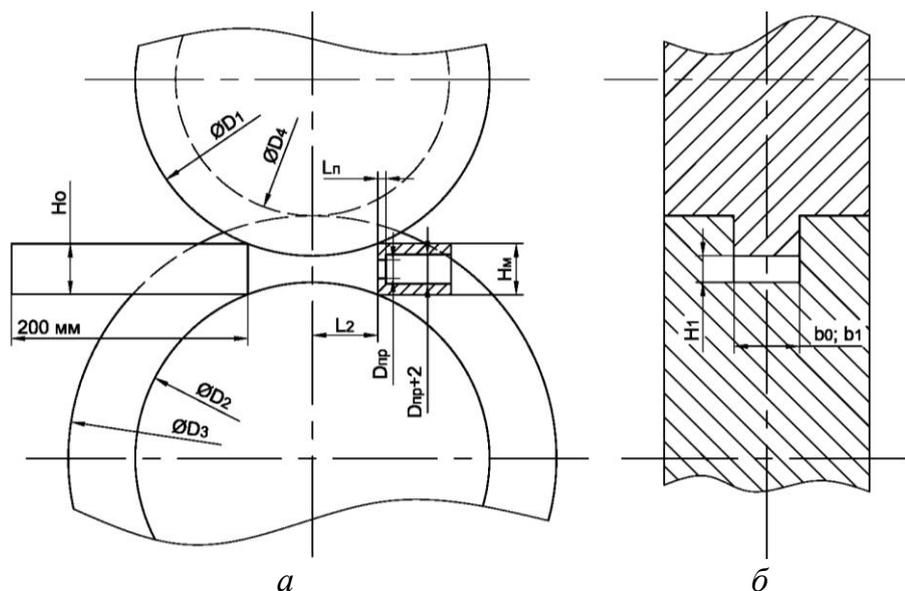


Рис. 5.54. Схема для моделирования процесса СПП: а – схема процесса вдоль очага деформации; б – разрез очага деформации по плоскости наименьшего сечения калибра

После моделирования процесса при помощи кнопки «Параметры» в главном меню Пост. Процессора (рис. 5.55) вызывают окно параметров. В нем устанавливают переключатель напротив пункта Температура и нажимают кнопку «Apply».

Далее при помощи кнопки «Разрез» вызывают панель настройки и задают необходимые параметры разреза (рис. 5.56).

В результате этого можно получить распределение температуры вдоль очага деформации (рис. 5.57, 5.58). Результаты сохраняют, после чего проводят анализ полученных картин распределения температур. На его основе предлагают меры по корректировке технологического режима обработки, если они необходимы.

Для моделирования распределения напряжений вдоль очага деформации при совмещенной прокатке-прессовании выбирают вариант задания из табл. 5.1. После моделирования процесса при помощи кнопки «Параметры» в главном меню Пост. Процессора вызывают

окно параметров (см. рис. 5.55). В нем устанавливают переключатель напротив пункта «Stress Effective» и нажимают кнопку «Apply». Далее при помощи кнопки «Разрез» вызывают панель настройки и задают необходимые параметры разреза (см. рис. 5.56). В результате чего должны быть получены картины распределения напряжений вдоль очага деформации при СПП (рис. 5.59). Сохранив результаты, проводят анализ полученных данных по распределению температур и напряжений на разных стадиях процесса СПП.

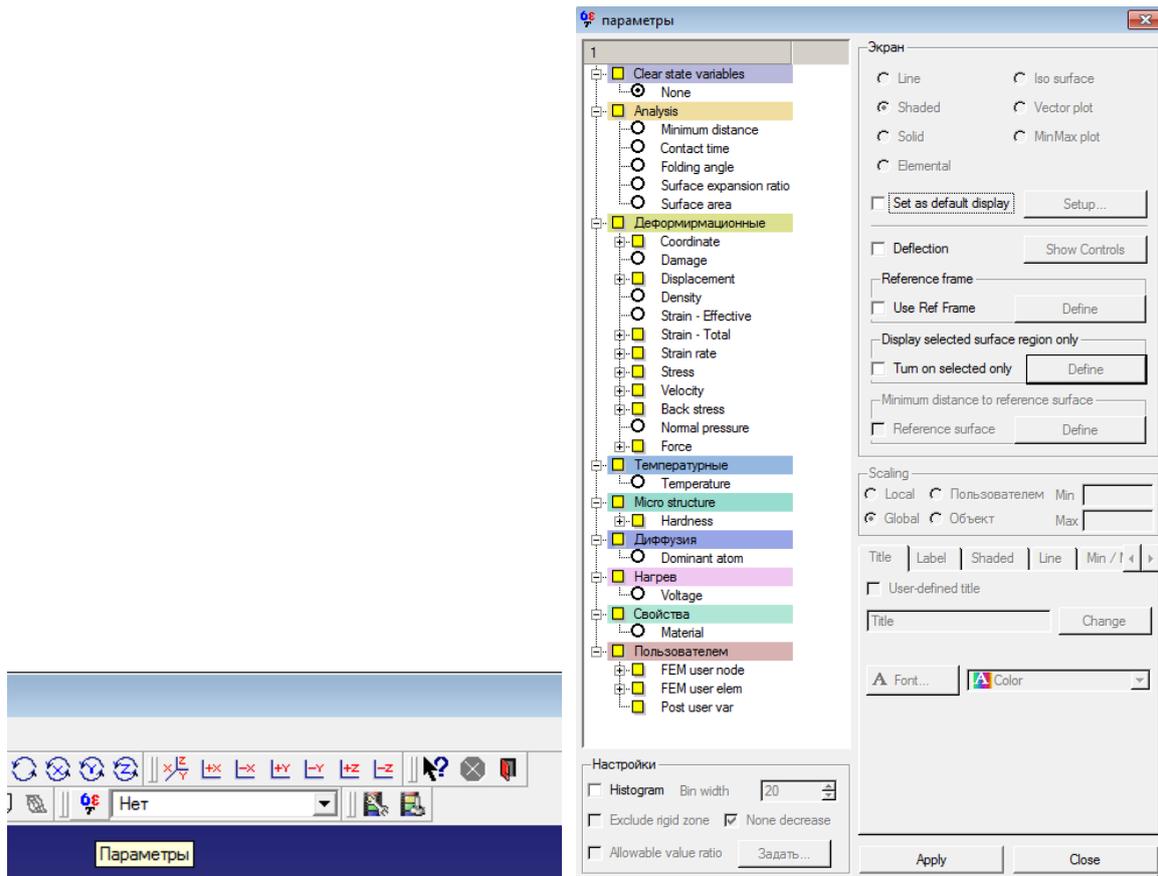


Рис. 5.55

Таблица 5.1

Варианты заданий

Номер варианта		1	2	3	4	5	6
Катающий диаметр валка с выступом, мм	$D1$	400	410	420	430	440	450
Катающий диаметр валка с ручьём, мм	$D2$	400	410	420	430	440	450
Диаметр бочки валка с ручьём, мм	$D3$	500	510	520	530	540	550
Высота калибра в наименьшем сечении, мм	$H1$	20	20	20	20	20	20
Ширина калибра, мм	$b1$	40	40	40	40	40	40

Окончание табл. 5.1

Номер варианта		1	2	3	4	5	6
Удаление матрицы от плоскости наименьшего сечения калибра, мм	$L2$	45	45	45	45	45	45
Диаметр готового прутка, мм	$d_{пр}$	15	15	15	15	15	15
Длина калибр. пояска матрицы, мм	$l_{п}$	3	3	3	3	3	3
Диаметр бочки валка с выступом, мм	$D4$	340	350	360	370	380	390
Высота зеркала матрицы, мм	$H_{м}$	30	30	30	30	25	25
Геометрические размеры заготовки							
Высота, мм	$H0$	40	40	40	40	40	40
Ширина, мм	$b0$	40	40	40	40	40	40
Катающий диаметр валка с выступом, мм	$D1$	214	220	226	232	238	244
Катающий диаметр валка с ручьём, мм	$D2$	162	168	174	180	186	192
Диаметр бочки валка с ручьём, мм	$D3$	220	225	230	235	240	245
Высота калибра в наименьшем сечении, мм	$H1$	7	7	7	7	7	7
Ширина калибра, мм	$b1$	14	14	14	14	14	14
Удаление матрицы от плоскости наименьшего сечения калибра, мм	$L2$	37	37	37	37	37	37
Диаметр готового прутка, мм	$d_{пр}$	9	9	9	9	9	9
Длина калибр. пояска матрицы, мм	$l_{п}$	3	3	3	3	3	3
Диаметр бочки валка с выступом, мм	$D4$	170	177	184	191	198	205
Высота зеркала матрицы, мм	$H_{м}$	23	22	21	21	21	20
Геометрические размеры заготовки							
Высота, мм	$H0$	14	14	14	14	14	14
Ширина, мм	$b0$	14	14	14	14	14	14

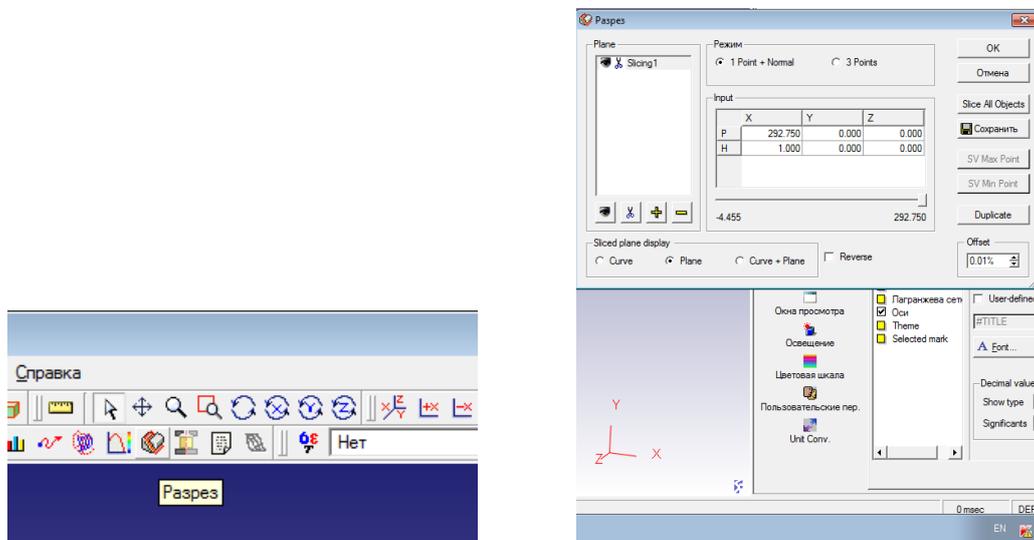


Рис. 5.56

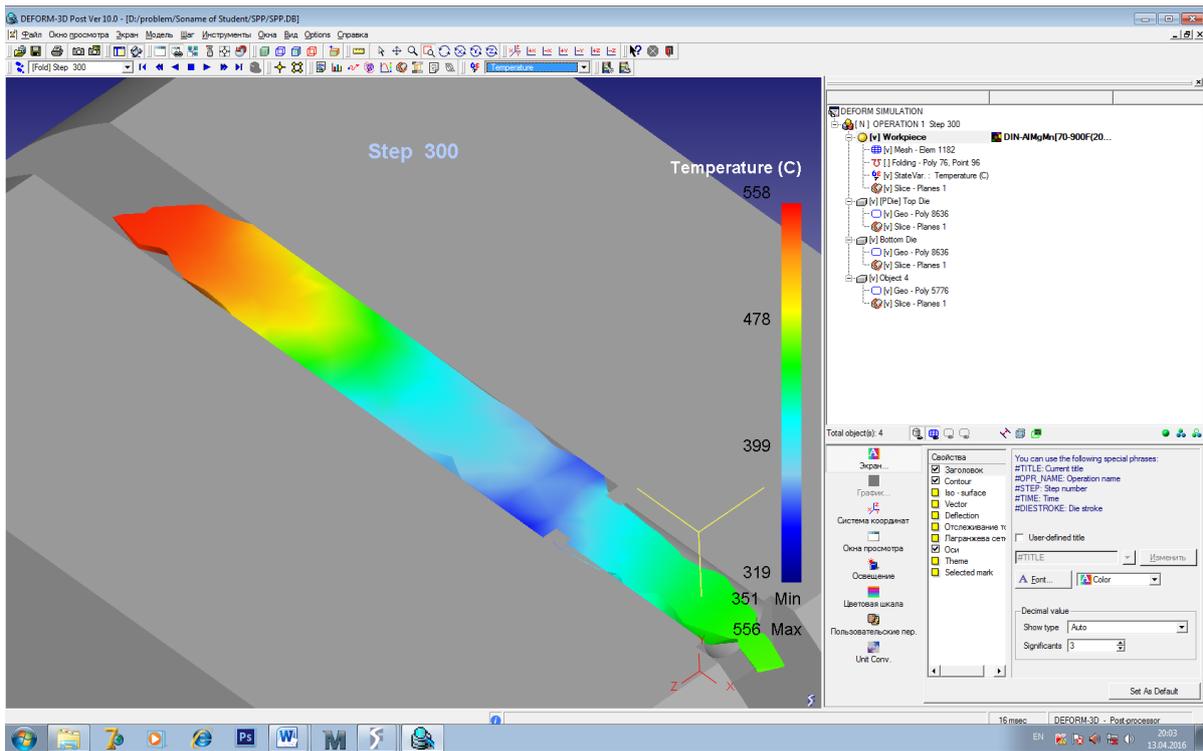


Рис. 5.57

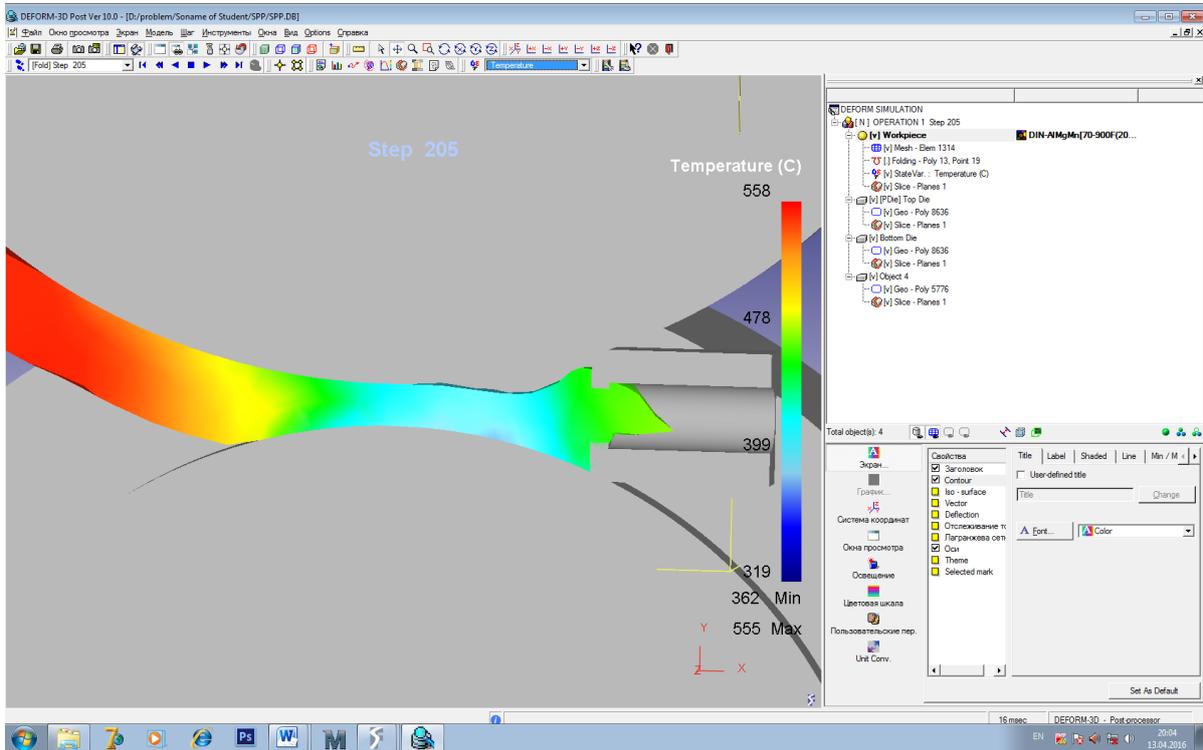


Рис. 5.58

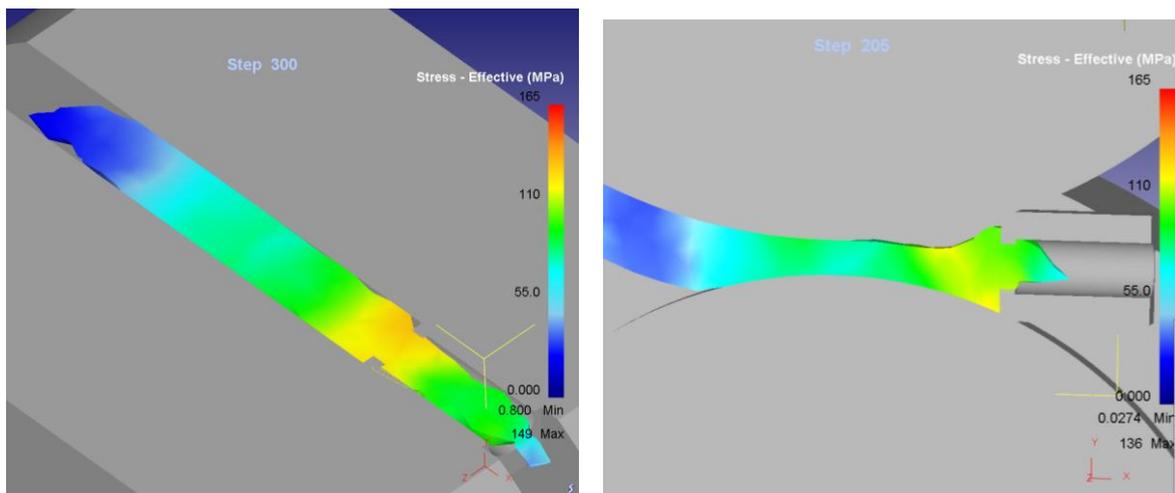


Рис. 5.59

5.4. Проектирование процесса горячей прокатки крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов

Моделирование процесса горячей прокатки крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов с помощью пакета Deform 3D покажем на примере получения листов на стане СГП Кварто 2800. В табл. 5.2 и 5.3 приведены технические характеристики этого стана и данные для создания модели процесса горячей прокатки на промышленном реверсивном стане. На основе результатов моделирования можно анализировать изменения геометрии раската, изучать температурные условия и напряженно-деформированное состояние металла, а также оценивать причины разрушения проката в прикромочной области.

В программном комплексе SolidWorks создавались трехмерные модели промышленных слитков для горячей прокатки и рабочий инструмент, которые загружали в препроцессор программы Deform 3D для последующего компьютерного моделирования. После этого вводились реологические свойства материалов и температурно-скоростные параметры деформации, показатель трения, обозначались границы соприкосновения заготовки с деформирующим инструментом согласно параметрам технологического процесса.

Материал валка принят абсолютно жестким, а моделирование процесса горячей прокатки велось для 1/4 заготовки без применения эджерной (вертикальной) клетки, поэтому для наглядности в Deform 3D были добавлены симметричные виды.

Таблица 5.2

Технические характеристики стана СГП Кварто 2800

Параметр	Величина
Диаметр рабочих валков, мм	710–750
Диаметр опорных валков, мм	1 300–1 400
Длина бочки валков, мм	2 800
Ширина прокатываемой полосы, мм	2 560
Скорость прокатки номинальная, м/с	2,2
Скорость прокатки максимальная, м/с	4,7
Усилие прокатки допустимое, МН	30
Крутящий момент максимальный, МНм	2
Мощность двигателя, кВт	2 × 3 200
Вертикальные валки	
Диаметр валков, мм	900–1 000
Давление металла на валки, тс	430
Скорость прокатки номинальная, м/с	1,0–2,5
Крутящий момент, МНм	0,3

Таблица 5.3

Данные для создания модели процесса горячей прокатки

Наименование параметра	Значение
Диаметр рабочих валков, мм	700
Длина бочки валка, мм	2 800
Начальная температура слитка, °С	425
Скорость в первых проходах, м/с	1,5
Скорость в последующих проходах, м/с	5
Размеры слитка, мм	300 × 1 400 × 1700
Размеры проката, мм	80 × 1 500 × L
Технологические паузы между проходами, с	10–30
Количество конечных элементов, на которые разбит слиток, тыс. шт.	100
Количество конечных элементов по мере уменьшения высоты раската и увеличения длины, тыс. шт.	180

Модель процесса прокатки, используемая для расчетов в пакете Deform 3D, приведена на рис. 5.60. Было учтено, что в первых проходах не рекомендуется применять скорость прокатки больше 1,0–1,2 м/с, особенно при больших обжатиях, так как вследствие интенсивно-

го налипания значительная часть наружной поверхности полосы может покрыться трещинами.

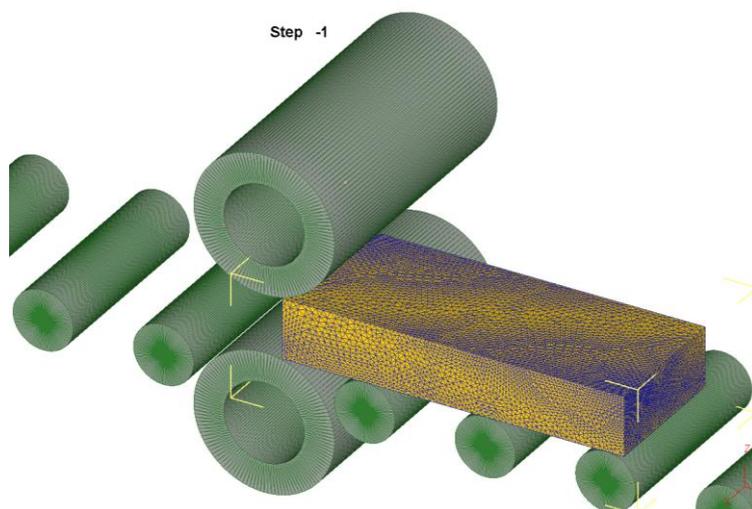


Рис. 5.60. Модель процесса прокатки слитка в программе Deform 3D

При дальнейшей прокатке величина обжатия лимитируется только углом захвата и величиной сил, возникающих при прокатке. Поэтому обжатия по проходам распределяются таким образом, чтобы в начале прокатки они были равны 8–10 %, а затем по мере дробления литой структуры и возрастания пластичности раската увеличивались, достигая в последних проходах 45 % и более.

Число проходов горячей прокатки и схема обжатий для получения готового размера плиты приведены в табл. 5.4. Расчет сопровождался анализом формоизменения обрабатываемых заготовок, оценкой напряженно-деформированного состояния, изменения температуры в объеме заготовки.

Опираясь на результаты моделирования, приведенные на рис. 5.61, установлено, что распределение температуры по поверхности весьма неравномерно. Температура боковой поверхности и области кромки ниже, чем поверхности раската (рис. 5.61, *а*). Анализ распределения температур по объему раската показал, что поверхностные слои за счет более интенсивной деформации разогреваются до более высоких температур (рис. 5.61, *б*). Кроме того, на крупногабаритных слитках центральные слои в процессе деформации в первых проходах практически не разогреваются (рис. 5.61, *в*). По мере уменьшения толщины раската, температура по сечению выравнивается (рис. 5.61, *г*). Температура центральной части раската имеет минимальный теплоот-

вод, а последующая деформация способствует постепенному увеличению температуры на 5–10 °С за проход, но с уменьшением толщины металла и увеличением времени пауз между проходами до 30 с отвод тепла от центральной части слитка возрастает.

Таблица 5.4

**Режим обжатий при горячей прокатке слитка размерами
300 × 1 400 × 1 700 мм**

№ прохода	Толщина, мм	Абсолютное обжатие, мм	Единичное обжатие, %	Время паузы, с
	300	–	–	–
1	290	10	3	10
2	280	10	3	10
3	270	10	4	10
4	260	10	4	10
5	245	15	6	10
6	230	15	6	10
7	215	15	7	10
8	200	15	7	10
9	185	15	8	10
10	170	15	8	30
11	155	15	9	30
12	140	15	10	30
13	125	15	11	30
14	110	15	12	30
15	95	15	14	30
16	80	15	16	30

Таким образом, анализ распределения температурных полей полосы по ходу прокатки показал, что областями с минимальной температурой являются кромки раската. Деформация металла в различных слоях по толщине раската до 10 прохода, когда время паузы между проходами составляло 10 с, приводит к росту температуры наиболее интенсивно на поверхности раската и в центре – с 425 до 460 °С, и менее интенсивно в кромке раската.

После этого прохода время пауз было увеличено до 30 с во избежание перегрева раската, в результате чего его температура стабилизировалась, а температура кромочной области снизилась до 423 °С. Распределение температур в объеме раската коррелирует с распреде-

лением накопленной интенсивности деформации по продольному и поперечному сечению раската после проходов (рис. 5.62).

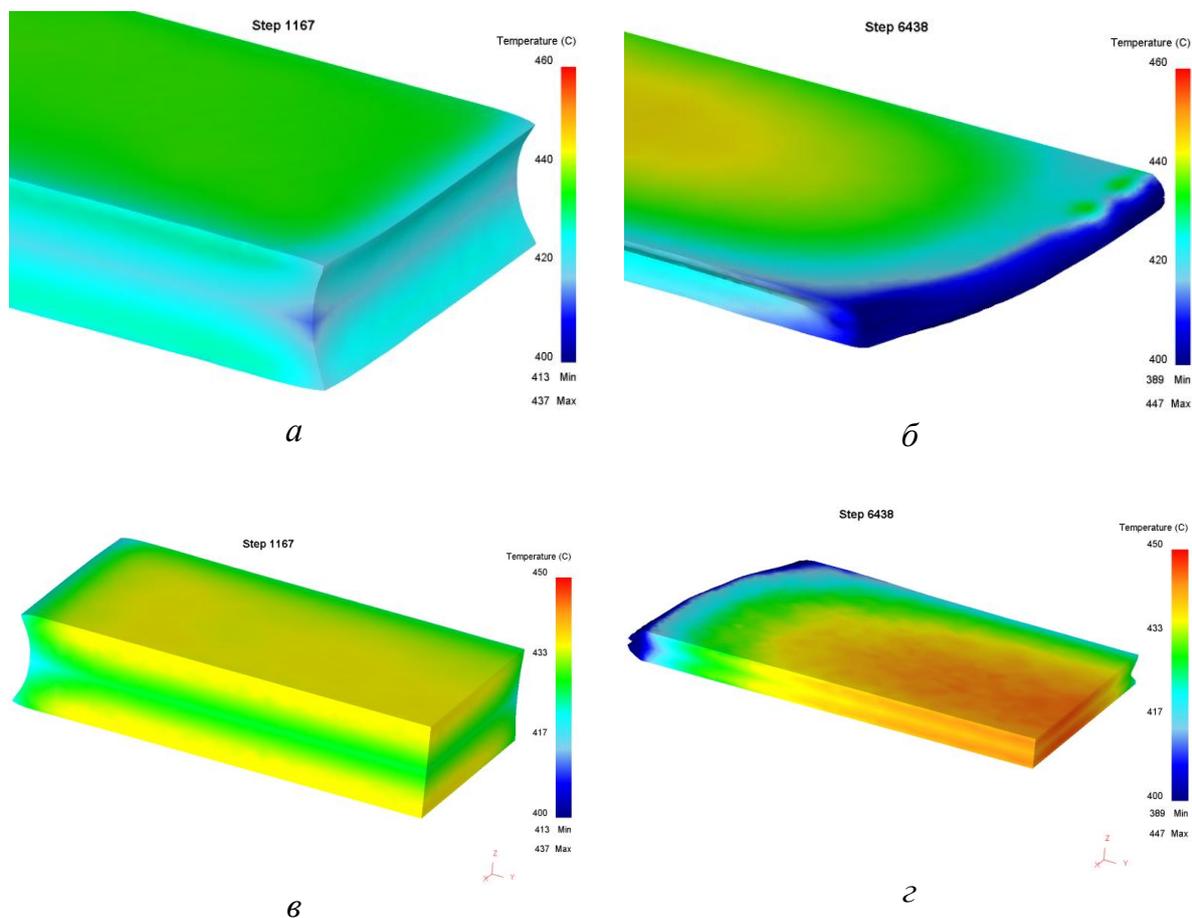


Рис. 5.61. Распределение температуры по поверхности раската (*а, б*) и по сечению раската (*в, г*) после проходов: *а, в* – № 4; *б, г* – № 16

Минимальная деформация накоплена в середине заготовки и растёт вплоть до максимального значения на поверхности заготовки. Видно, что после прохода № 4 деформация локализована в приповерхностных слоях и не распространяется до центра раската (рис. 5.62, *а*).

С уменьшением толщины заготовки до 80 мм к проходу № 16 деформация распространяется на всю толщину раската (рис. 5.62, *б*).

Указанный характер деформирования раската по проходам подтверждает и распределение интенсивности напряжений в очаге деформации по продольному сечению заготовки в проходах (рис. 5.62, *в, г*). Если рассмотреть распределение напряжений по оси *Y* в очаге деформации по проходам, то можно обнаружить наличие растягивающих напряжений в металле на поверхности раската в зонах перед входом в очаг деформации и на выходе, а также в центре раската и на боковых гранях, особенно в первых проходах.

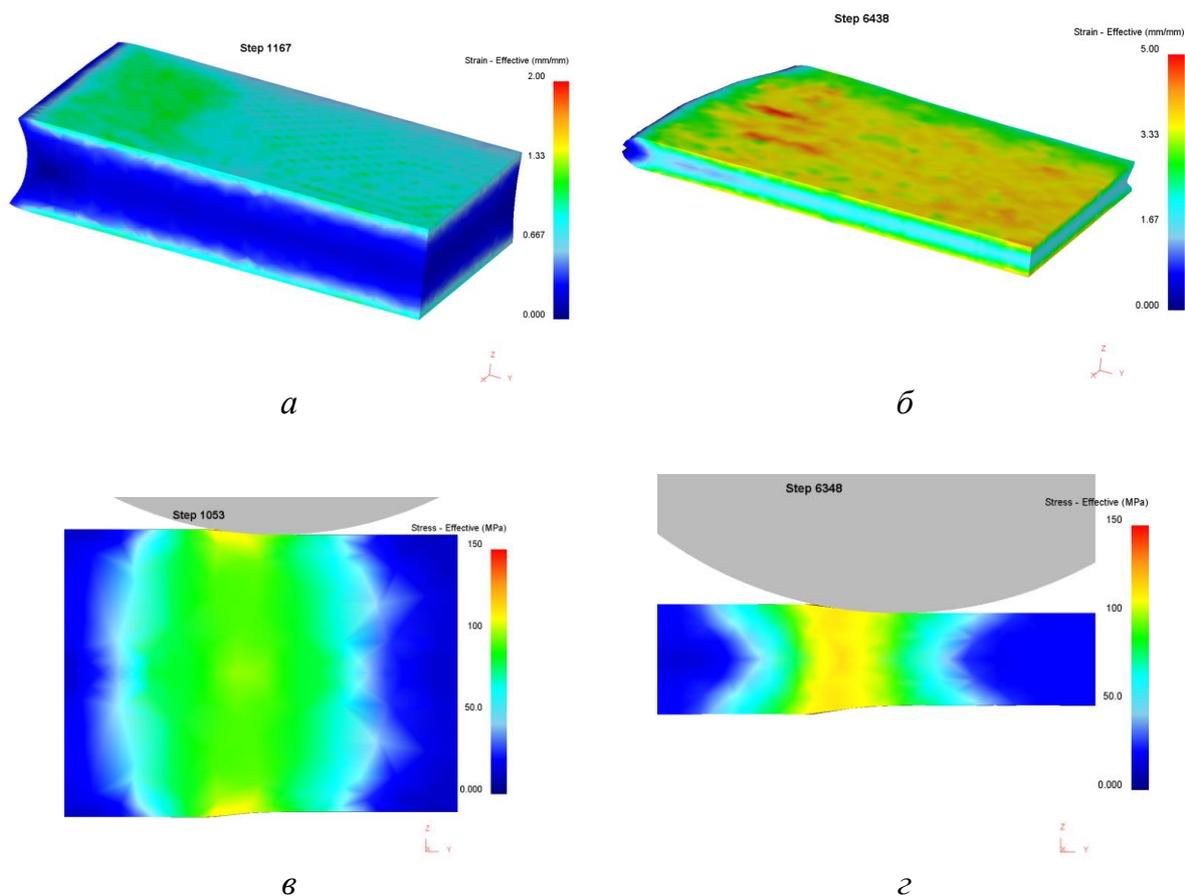


Рис. 5.62. Распределение накопленной интенсивности деформации по продольному и поперечному сечению раската (*а*, *б*) и интенсивности напряжений по продольному сечению заготовки (*в*, *г*) после проходов: *а*, *в* – № 4, *б*, *г* – № 16

На рис. 5.63 показано изменение значений критерия Кокрофта–Латама по проходам в трех точках центральной части длины раската: центр по толщине раската, поверхность посередине и кромка (угол перехода с поверхности на боковую грань).

Из анализа распределения критерия Кокрофта–Латама по поверхности раската можно сделать вывод, что на кромке раската он приближается к значению 0,5, что говорит о неблагоприятной схеме напряженного состояния в этой области и возможности появления поперечных угловых трещин раската при дальнейшей прокатке.

Рассмотрим пример проектирования процесса горячей прокатки на промышленном стане СГП Кварто 2800, техническая характеристика которого представлена в табл. 5.5. Параметры слитка и листового проката а также данные, использованные для создания модели процесса горячей прокатки слябов большего поперечного сечения на промышленном стане СГП Кварто 2800, приведены в табл. 5.6.

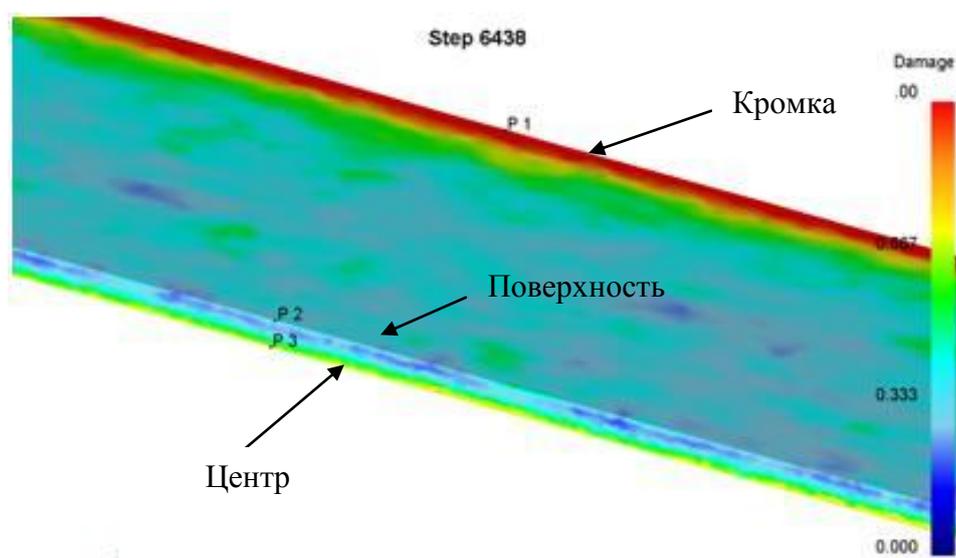


Рис. 5.63. Изменение критерия Кокрофта–Латама по проходам в трех точках центральной части раската: P3 – центр раската, P2 – поверхность по середине и P1 – кромка (показана 1/4 заготовки)

Таблица 5.5

**Технические характеристики промышленного стана СГП
Кварто 2800**

Параметр	Величина
Диаметр рабочих валков, мм	914–965
Диаметр опорных валков, мм	1 300–1 400
Длина бочки валков, мм	2 845
Ширина прокатываемой полосы, мм	2 500
Скорость прокатки максимальная, м/с	2
Усилие прокатки допустимое, МН	40
Крутящий момент максимальный, МН*м	2,8

При моделировании был предусмотрен конвекционный теплообмен, а температура помещения должна составлять 20 °С. В период технологических пауз охлаждение валков смазывающе-охлаждающей жидкостью (СОЖ) не используется, температура СОЖ равна 55 °С. Результаты моделирования приведены в табл. 5.7 и на рис. 5.64, 5.65.

Анализ режима обжатий показывает, что для прокатки крупногабаритного слитка с суммарной степенью деформации 98,2 % необходимо 35 проходов (табл. 5.7). При этом степень обжатия в первых проходах составляет 3–5 %, а в последних достигает 20–27 %. Энергосиловые параметры прокатки (усилие и момент прокатки) не пре-

вышают допустимых значений. Максимальные значения этих параметров приходятся на первый проход, в котором температура исходной заготовки задана, исходя из условий промышленного производства и требований к механическим свойствам получаемых деформированных полуфабрикатов.

Таблица 5.6

Данные для создания модели процесса горячей прокатки

Наименование параметра	Значение
Диаметр рабочих валков, мм	965
Длина бочки валка, мм	885
Начальная температура слитка, °С	410
Скорость прокатки, м/с	0,5 – 2
Размеры исходного слитка, мм	445 × 1 400 × 4 000
Конечная толщина горячего раската, мм	8
Технологические паузы между проходами, с	10–15
Максимальная сила прокатки, МН	до 40
Максимальный момент прокатки, МН*м	2,8

Таблица 5.7

**Результаты моделирования горячей прокатки сляба размерами
44 × 1 400 × 4 000 мм**

№ прохода	Абсолютное обжатие, мм	Степень обжатия, %	Толщина, мм	Расчетная длина, м	Скорость прокатки, м/с	Время прокатки, с	Время паузы, с	Температура, °С	Усилие прокатки, МН	Момент прокатки, МН*м
			445	4,0						
1	15	3,4	430	4,1	0,50	9,8	10,0	430	22,0	2,43
2	15	3,5	415	4,3	0,50	9,4	10,0	431	21,8	2,40
3	15	3,6	400	4,5	0,50	9,9	10,0	433	21,4	2,36
4	15	3,8	385	4,7	0,50	10,4	10,0	434	21,1	2,33
5	15	3,9	370	4,9	0,50	11,1	10,0	435	20,8	2,29
6	15	4,1	355	5,2	0,50	11,6	10,0	437	20,5	2,26
7	18	5,1	337	5,5	1,00	6,1	10,0	438	21,5	2,60
8	18	5,3	319	5,7	1,00	6,5	15,0	439	20,7	2,50
9	18	5,6	301	6,0	1,00	7,0	15,0	441	19,9	2,40
10	18	6,0	283	6,3	1,00	6,9	15,0	442	19,0	2,30
11	18	6,4	265	6,7	1,00	8,0	15,0	443	18,7	2,27

Окончание табл. 5.7

№ прохода	Абсолютное обжатие, мм	Степень обжатия, %	Толщина, мм	Расчетная длина, м	Скорость прокатки, м/с	Время прокатки, с	Время паузы, с	Температура, °С	Усилие прокатки, МН	Момент прокатки, МН*м
12	18	6,8	247	7,1	1,00	7,3	15,0	445	18,2	2,20
13	15	6,1	232	7,5	1,00	8,2	60,0	446	15,7	1,74
14	15	6,5	217	8,0	1,00	8,4	28,0	448	15,4	1,70
15	15	6,9	202	8,6	1,00	9,0	10,0	450	15,4	1,70
16	12	5,9	190	9,1	1,00	9,3	15,0	450	14,3	1,41
17	12	6,3	178	9,7	1,00	10,1	15,0	450	14,3	1,41
18	12	6,7	166	10,4	1,00	10,7	15,0	450	13,2	1,30
19	12	7,2	154	11,2	1,00	11,6	15,0	450	13,2	1,30
20	12	7,8	142	12,2	1,00	12,4	15,0	450	13,3	1,31
21	12	8,5	130	13,3	1,00	13,5	15,0	450	13,2	1,30
22	12	9,2	118	14,6	1,00	14,9	15,0	450	13,1	1,29
23	12	10,2	106	16,2	1,50	10,9	15,0	450	13,0	1,28
24	12	11,3	94	18,3	1,50	12,3	15,0	447	12,9	1,27
25	12	12,8	82	20,9	1,50	13,7	15,0	444	12,9	1,27
26	12	14,6	70	24,5	1,50	16,3	15,0	441	13,1	1,29
27	11	15,7	59	29,0	1,50	19,3	15,0	438	13,1	1,24
28	11	18,6	48	35,6	1,50	23,7	15,0	435	12,7	1,20
29	11	22,9	37	46,1	1,50	30,7	15,0	432	13,0	1,23
30	8	21,6	29	58,7	2,00	32,4	15,0	429	13,2	1,06
31	6	20,7	23	73,9	2,00	37,0	15,0	426	17,6	1,23
32	5	21,7	18	94,3	2,00	47,2	15,0	423	16,6	1,06
33	4	22,2	14	121,1	2,00	60,5	15,0	420	16,5	0,94
34	3	21,4	11	153,9	2,00	76,9	15,0	417	17,1	0,84
35	3	27,3	8	211,3	2,00	105,6		380	19,8	0,98

Анализируя течение металла (рис. 5.64), отметим, что при прокатке с заданными обжатиями его формоизменение протекает аналогично данным проведенных ранее экспериментальных исследований. Температура раската в соответствии с рис. 5.65 и 5.66 с уменьшением толщины снижается; преимущественно более сильному разогреву подвержены центральные части слитка как в продольном, так и в поперечном сечении.

Значения критерия Кокрофта–Латама в результате моделирования горячей прокатки не превышают 0,04 в центре раската с 1-го по 17-й проход, а на кромке не превышают 0,06 (рис. 5.67). Таким образом, полученные значения критерия Кокрофта–Латама в проходах с 1-го по 17-й не превышают допустимые значения, равные 0,28.

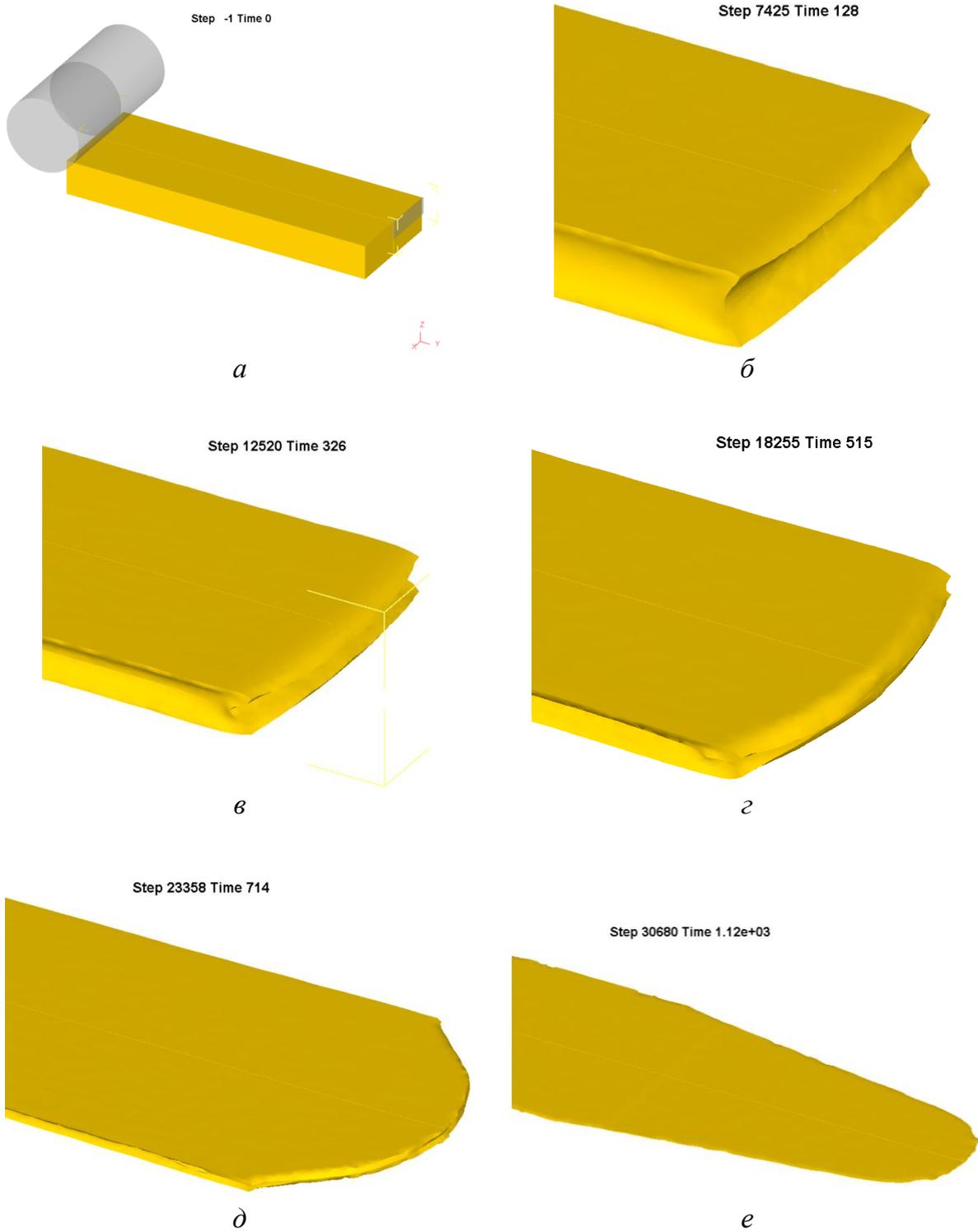


Рис. 5.64. Форма проката после горячей прокатки по проходам: *a* – № 1; *б* – № 7; *в* – № 14; *г* – № 21; *д* – № 28; *е* – № 35

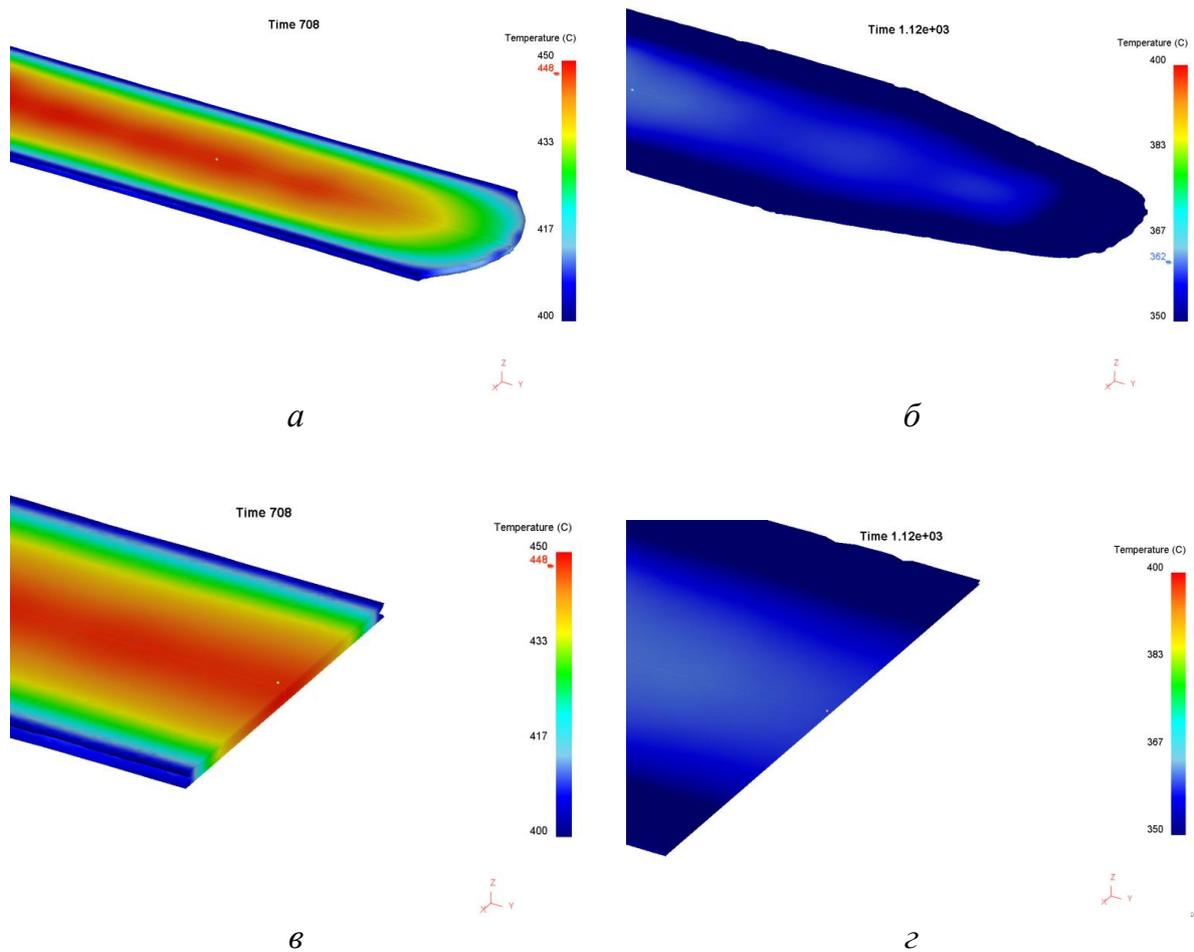


Рис. 5.65. Температура металла в проходах № 28 (а, в) и № 35 (б, г):
а, б – продольное сечение; в, г – поперечное сечение раската

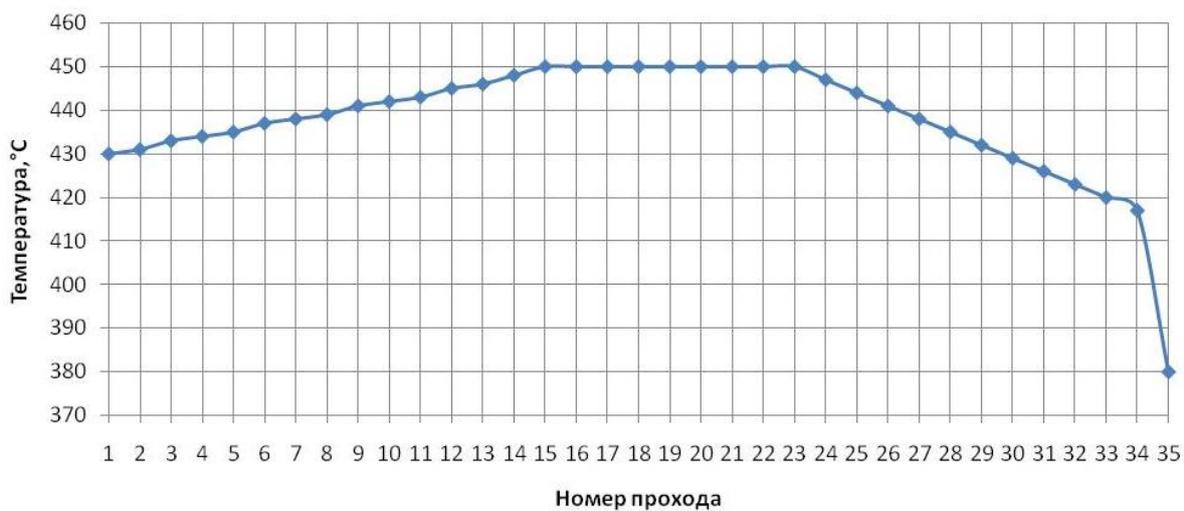


Рис. 5.66. Изменение температуры металла по проходам прокатки

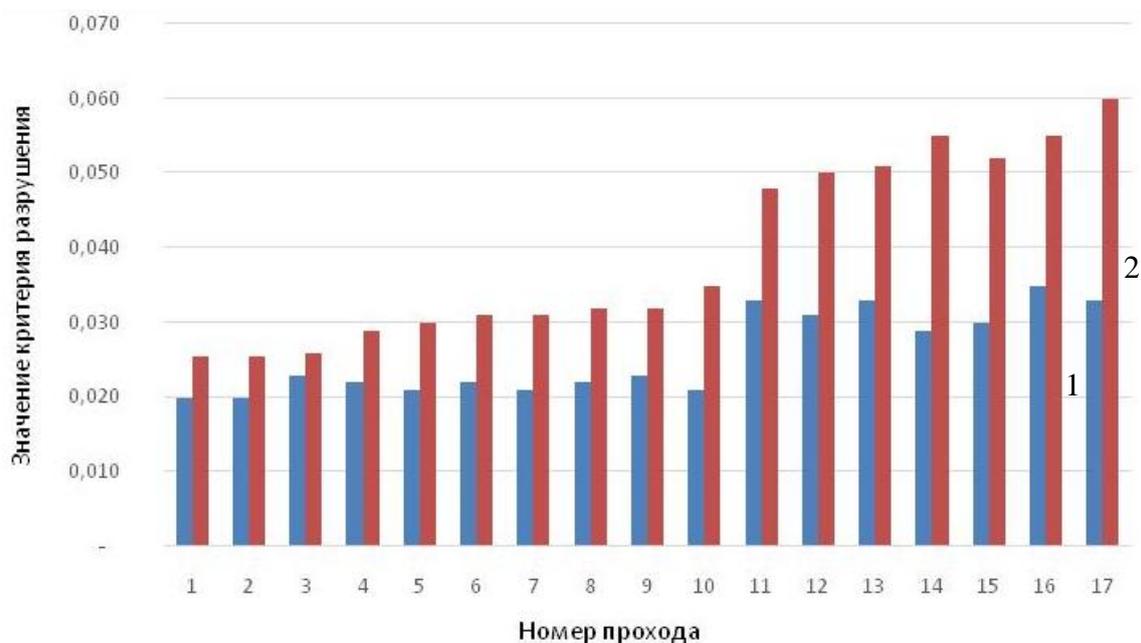


Рис. 5.67. Значение критерия Кокрофта–Латама по проходам:
1 – центр, 2 – кромка

Таблица 5.8

Варианты заданий

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры слитка, мм:										
высота	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
ширина	1200	1300	1400	1400	1400	1400	1500	1700	2000	2000
длина	1500	1600	1700	2000	2500	4000	5000	5000	6000	6000
Размеры проката, мм:										
высота	80	80	80	30	20	15	10	8	6	5
ширина	1250	1350	1500	1500	1500	1500	1600	1870	2100	2100
Длина мерная, мм	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000

Для практических занятий предлагается с помощью компьютерных моделей рассчитать параметры горячей прокатки на стане СПГ 2800 в соответствии с вариантами заданий (табл. 5.8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время в связи с развитием информационных технологий и компьютерного моделирования все большие требования предъявляют к углубленной подготовке в этой сфере специалистов инженерного профиля, связанных с разработкой и проектированием технологических процессов. Эта же тенденция относится к области обработки металлов давлением, где традиционно используются методы вычислительного и физического моделирования, стандартные пакеты прикладных программ и статистическая обработка экспериментальной информации. Поэтому подготовка специалистов-металлургов как для производства, так и для науки требует сегодня не просто компьютерной грамотности, а владения навыками математического моделирования процессов ОМД и автоматизации их проектирования.

С этой целью в данном учебном пособии изложены основные методологические подходы к систематизированному освоению основ моделирования технологических процессов ОМД, их автоматизации и приведены необходимые материалы для самостоятельного изучения. Представленные на основе анализа научно-технической и учебной литературы состояние и перспективы развития САПР в исследуемой области позволят студентам грамотно определить направление и средства для реализации новых идей и разработок. Кроме того, для углубленного изучения отдельных аспектов автоматизации проектирования имеются примеры расчета с использованием САПР практически для любых операций обработки металлов давлением, включая и такие новые процессы, как, например, совмещенная прокатка-прессование.

Особенностью учебного пособия является то, что в основе алгоритмов для расчета деформационных режимов обработки и энергосиловых параметров большинства приведенных процессов лежат научные результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами. Создание же программного обеспечения для проектирования деформирующего инструмента выполнялось в тес-

ном сотрудничестве с работниками металлургических предприятий (Красноярский металлургический завод, Верхнее-Салдинское металлургическое производственное объединение, Красноярский завод цветных металлов и др.), что дает основание считать эти разработки близкими к практической реализации.

Материалы пособия могут быть полезны не только студентам, но и аспирантам, а также научным и инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области обработки металлов давлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Губанов И.Ю. [и др.]. Моделирование и автоматизированное проектирование технологических процессов обработки металлов : учеб. пособие. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2007.

2. Сидельников С.Б., Константинов И.Л., Ворошилов Д.С. Технология прокатки : учебник. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015.

3. Константинов И.Л., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н. [и др.]. Технология прессования : учебник. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017.

4. Бер В.И., Сидельников С.Б., Соколов Р.Е., [и др.]. Технология листовой штамповки : учеб. пособие. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018.

5. Константинов И.Л. Технологияковки и горячей объемной штамповки : учебник. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012.

6. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Теплотехник, 2010.

7. Щерба В.Н., Райтбарг Л.Х. Технология прессования металлов: учебник для вузов. – М. : Металлургия, 1995.

8. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства : учебник для вузов. – М. : Машиностроение, 1976.

9. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л. : Машиностроение, 1979.

10. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные процессы обработки цветных металлов и сплавов : монография. [Б.м.]. 2005.

11. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.

12. Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Васина Г.И. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов: Научное методическое обеспечение : монография. – Красноярск : КГАЦМиЗ, 2000.

13. Тарновский И.Я., Вайсбурд Р.А., Еремеев Г.А. Автоматизация проектирования технологии горячей штамповки. – М. : Машиностроение, 1969. – 240 с.
14. Алиев Ч.А., Тетерин Г.П. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объемной штамповки. – М. : Машиностроение, 1969. – 224 с.
15. Петров А.И., Тарасов В.С., Девятериков А.Г. [и др.]. Автоматизированное проектирование технологии обработки давлением. – Ижевск : Удмуртия, 1978.
16. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства / пер. с англ. – М.: Мир, 1987.
17. Гун Г.Я., Прудковский Б.А. Автоматизированное проектирование матриц для прессования профилей // Автоматизация процессов и обработки металлов давлением. – М. : Наука, 1979. – С. 128–133.
18. Трубин В.Н., Лебедев В.А., Широковских В.Г. Система автоматизированного проектирования технологических процессовковки : учеб. пособие – Свердловск : Урал. политехн. ин-т, 1983.
19. Смирнов О.Л., Падалко С.Н., Пилявский С.А. САПР: формирование и функционирование проектных моделей. – М. : Машиностроение, 1987.
20. Ковалеский В.А., Савинов А.Н. Методическая интеграция прикладных систем, разработанных с использованием интегрированной среды СПРУТ // САПР и графика. – 1998. – № 8. – С. 28–34.
21. Крючков А. Новая технология автоматизированного решения инженерных задач // Компьютер пресс. – 1997. – № 10. – С. 234–329.
22. Соломцев Ю.М., Диденко В.П., Митрофанов В.Г. [и др.]. Робототехника и гибкие автоматизированные производства: в 9 кн. Кн. 8. Основы построения систем автоматизированного проектирования гибких производства : учеб. пособие для вузов / под ред. И.М. Мякарова. – М. : Высш. шк., 1986.
23. Гореткина Е. САПР вчера и сегодня // PC Week/ Russian Edition № 2, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pcweek.ru/Year2003/N2/CP1251/Sapr>.
24. Универсальная CAD/CAM/CAE/PDM система CATIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.catia.ru/catia_solution_NEW.htm. Загл. с экрана.
25. Краткая история PTC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pts-russia.com/about/about_ptc.htm.
26. Unigraphics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ugs.ru>.

27. Программный комплекс T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.tflex.ru/products/complex>.

28. Саевич Ю. КОМПАС-Штамп 5.6 – новые инструменты для конструктора технологической оснастки // САПР и графика. – 2006.

29. Каталог САПР. Программы и производители. 2017–2018. – М.: Солон-Пресс, 2017. – 800 с.

30. Друмов А., Кузнецов С., Малов М. Технологическая подготовка штампового производства с использованием SolidWorks. Ч. 1 // САПР и графика. – 2005. – № 6. – С. 20, 22–26, 28.

31. Харламов А., Уваров А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением // САПР и графика. – 2003. – № 6: Инструменты конструктора-технолога. – С. 34–36.

32. Дубинский С. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0. // САПР и графика. – № 3. – 2004.

33. ГОСТ 24.601–86. Автоматизированные системы. Стадии создания. – М., 1986.

34. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 12. – СПб. : Изд-во «БХВ-Петербург», 2004.

35. Алейников И.А. Практическое использование пакета Mathcad при решении задач : учеб. пособие. – М. : Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации, 2002.

36. Шестаков Н.А. Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом : учеб. пособие. – М. : МГИУ, 2008.

37. Долженков В.А., Стученков А.Б. Самоучитель Excel 2007. – СПб. : Изд-во «БХВ-Петербург», 2007.

38. Богдавленский К.Н., Камнев П.В. Изготовление деталей пластическим деформированием. – Л. : Машиностроение (Ленингр. отделение), 1975.

39. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1978.

40. Хайкин Б.Е. Аппроксимация эмпирических зависимостей в условиях обработки металлов давлением. – Свердловск : Изд. УПИ, 1984.

41. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1983.

42. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ : практ. руководство / пер. с англ. – М. : Мир, 1982.
43. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. – Woburn: Butterworth-Heinemann, 2005.
44. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – Woburn: Butterworth-Heinemann, 2005.
45. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.
46. Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. – М : ФИЗМАТЛИТ, 2003.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОМД НА ЭВМ	5
1.1. Содержание программы обучения по моделированию и проектированию технологических процессов обработки металлов давлением	5
1.2. Основные понятия и содержание автоматизированного проектирования	9
1.3. Программное обеспечение, структура и классификация САПР	13
1.4. Содержание процесса разработки систем автоматизированного проектирования	38
1.5. Цели и задачи проектирования технологических процессов	45
Глава 2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ И ПРЕССОВАНИЯ	51
2.1. САПР горячей листовой прокатки цветных металлов и сплавов (САПР ROLLING)	51
2.2. САПР технологии горячей сортовой прокатки двутавровых профилей из сталей (САПР BALKA)	60
2.3. САПР технологии прессования алюминиевых сплавов (САПР INPRESS).....	72
2.4. САПР технологии совмещенной прокатки-прессования (САПР SPP).....	85
Глава 3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОВКИ И ШТАМПОВКИ.....	91
3.1. САПР ковки поковок типа «вал» (САПР VAL)	91
3.2. САПР объемной штамповки (САПР RYCHAG).....	99
3.3. САПР листовой штамповки (САПР KARTA).....	109
3.4. САПР проектирования штампов (САПР STAMP).....	117
Глава 4. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	122
4.1. Средства для решения задач математического моделирования ...	122
4.2. Реализация в среде MathCAD моделей на основе системы дифференциальных уравнений	135
4.3. Реализация в среде MathCAD моделей на основе интегральных уравнений энергетического баланса	154

4.4. Обработка экспериментальных данных с помощью Microsoft Excel и MathCAD	167
4.5. Реализация поиска экстремума функций в среде MathCAD	172
4.6. Средства пакета прикладных программ Ansys для решения задач пластической деформации металла.....	180
4.7. Моделирование с помощью пакете Ansys процесса осадки бруса	190
4.8. Моделирование с помощью пакета Ansys процесса листовой прокатки	193
Глава 5. ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА DEFORM 3D	198
5.1. Создание моделей инструментальной оснастки процесса совмещенной прокатки-прессования	198
5.2. Проектирование процесса совмещенной прокатки-прессования в программном комплексе Deform 3D.....	219
5.3. Расчет температуры и напряжений при совмещенной прокатке-прессовании.....	226
5.4. Проектирование процесса горячей прокатки крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов.....	230
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	242
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	244

Учебное издание

Сидельников Сергей Борисович
Довженко Иван Николаевич
Губанов Иван Юрьевич
Соколов Руслан Евгеньевич
Довженко Николай Николаевич
Рудницкий Эдвард Анатольевич
Галиев Роман Илсурович
Беспалов Вадим Николаевич
Белоконова Ирина Николаевна

**Моделирование и автоматизированное проектирование
технологических процессов
обработки металлов давлением**

Учебное пособие

Редактор Т.М. Пыжик
Корректор З.В. Малькова
Компьютерная верстка И.В. Гревцовой

Подписано в печать 22.10.2019. Печать плоская
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15,75
Тираж 100 экз. Заказ № 7721

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Для заметок