

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
“Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники”

Кафедра электронной техники и технологии

***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ***

Лабораторный практикум

для студентов специальности I-39 02 02
«Проектирование и производство радиоэлектронных средств»
и I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное
проектирование радиоэлектронных средств»

Под редакцией профессора С. П. Кундаса

Минск 2006

УДК 681.322 (075.8)
ББК 32.973.202 я 73
К 62

Рецензент:

доцент кафедры РЭС БГУИР, канд. техн. наук И. Н. Цырельчук

Авторы-составители:

С. П. Кундас, Д. В. Марковник, Б. А. Тонконогов
А. В. Лемзиков, С. Н. Мельников, В. Л. Ланин

Компьютерное моделирование технологических систем : Лаб. практикум
К 63 для студ. спец. I-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» и I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» / Сост. С. П. Кундас, Д. В. Марковник, Б. А. Тонконогов и др. ; Под. ред. проф. С. П. Кундаса. – Мн. : БГУИР, 2006. – 83 с. : ил.

ISBN 985-444-995-9

Лабораторный практикум содержит шесть лабораторных работ по изучению методов математического и графического моделирования и оптимизации технологических процессов и их исследованию с применением методов компьютерного моделирования.

УДК 681.322 (075.8)
ББК 32.973.202 я 73

ISBN 985-444-995-9

© Коллектив авторов, составление, 2006
© БГУИР, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. Компьютерное моделирование и исследование процесса плазменного нанесения покрытий.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Компьютерное моделирование и исследование процесса ультразвукового плющения лент, применяемых в электронных приборах.....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Исследование функциональных возможностей пре- и постпроцессоров современных конечноэлементных программных комплексов.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Моделирование технологического процесса закалки.....	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. Оптимизация технологического процесса сборки и монтажа электронного блока.....	54
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. Графическое моделирование и проектирование конструкций технологической оснастки с помощью системы T-FLEX CAD.....	68

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с технологией и изучение методов компьютерного моделирования процесса плазменного напыления покрытий изделий электронной техники, применяемых для этих целей программных средств. Исследование и оптимизация режимов плазменного напыления изоляционных и геттерных покрытий деталей и узлов мощных генераторных приборов с применением методов компьютерного моделирования.

1.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1 Применение плазменных покрытий в электронной технике

Тугоплавкие металлы и сплавы находят в настоящее время широкое применение в электронной технике.

Плазменные покрытия применяются для повышения электрической прочности деталей и узлов мощных генераторных приборов (МГП) в конструкциях катодно-подогревательных узлов (КПУ). Широко применяются электроизоляционные покрытия на основе оксида алюминия. Геттерные покрытия, обеспечивающие газопоглощение, формируются чаще всего из титана.

Можно выделить следующие конструктивные решения КПУ с применением плазменных покрытий [1, 2]:

- § создание монолитных компактных структур катод-подогреватель (рис. 1.1).
- § нанесение электроизоляционных покрытий на поверхность катода, противоположную эмиссионной стороне (рис. 1.2);
- § нанесение покрытия на элементы подогревателя;
- § создание многослойных переходных изоляционных структур в конструкции катодно-подогревательных узлов (рис. 1.3);

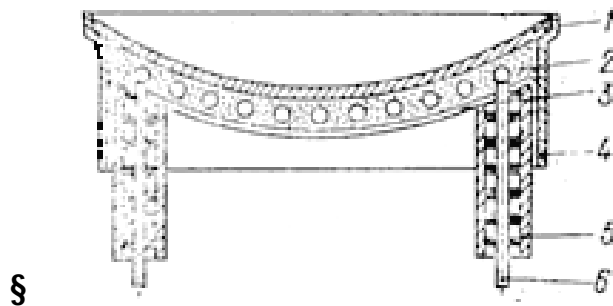


Рис. 1.1 Конструкция КПУ МГП с монокристаллическим подогревателем (1 – ядро катода; 2 – изолирующий материал; 3 – экран (Ni); 4 – держатель (Ni); 5 – трубка вывода подогревателя (Ni); 6 – подогреватель (W))

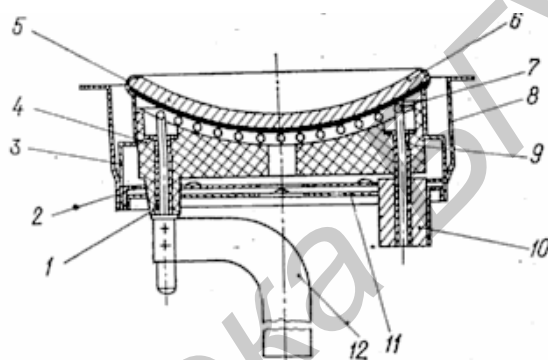


Рис. 1.2 Конструкция КПУ МГП (1,9 – пистоны (Ta); 2,3,8,11 – экраны (Ta); 4 – изолятор (Al_2O_3); покрытие $Al_2O_3 + W$ и Al_2O_3 ; 6 – катод; 7 – подогреватель (W); 10 – втулка (Mo); пластина (Ta)).

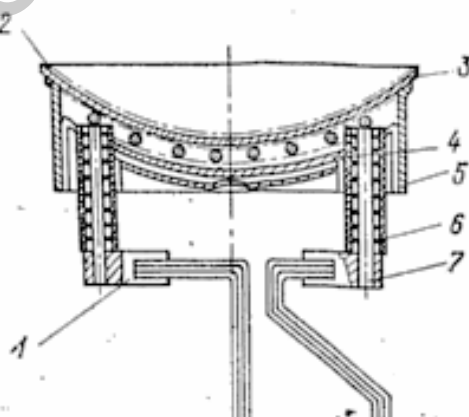


Рис. 1.3 Конструкция КПУ МГП с малым временем разогрева (1 – держатель вывода подогревателя (Mo); 2 – эмиссионное покрытие; 3 – ядро катода; 4 – экран (Ni); 5 – держатель (Ni); 6 – керамический изолятор; подогреватель (W)).

В производстве МГП широко применяются также антиэмиссионные и сорбционные (геттерные) покрытия на основе Ti, ZrB₂, металлов IV, Va групп. Благодаря хорошему сочетанию антиэмиссионных и геттерных свойств, наибольший интерес в этом отношении представляет титан. Особенностью геттерных покрытий является необходимость обеспечения в процессе их нанесения наряду с хорошей адгезией и высокой пористостью (до 60%).

1.1.2 Технология плазменного нанесения покрытий

Плазменное напыление - метод, при котором нагрев, плавление и перенос напыляемого материала осуществляются с помощью плазменной струи, образующейся в электрическом дуговом разряде. Плазменные струи получают в специальных устройствах, называемых плазмотронами. Типовая конструкция плазмотрона содержит водоохлаждаемые катод, анод и разделяющий их изолятор. Плазмообразующий газ подается в электрическую дугу, возбуждаемую между стержневым катодом и кольцевым анодом (соплом), нагревается и в виде плазменной струи вытекает из сопла. Распыляемый материал вводится в плазменную струю в виде порошка или проволок. Наиболее распространенная схема подачи распыляемого материала - перпендикулярно плазменной струе на срезе сопла.

Сжатие дуги в реакционной камере плазмотрона обеспечивает повышение температуры плазменной струи до 10000 – 15000 К. Нагрев и расширение газа способствует также получению высоких скоростей плазменной струи (300 – 800 м/сек), что делает возможным напыление покрытий из любых материалов без ограничений по температуре плавления.

Анализируя физико-химические процессы, протекающие при газотермических методах напыления, можно выделить следующие основные факторы, определяющие процесс напыления, - термический и кинетический. Первый фактор определяет температуру и запас теплоты, накапливаемый частицами напыляемого материала, второй - их скорость и запас кинетической энергии. Совместное действие этих факторов в общем случае определяет динамику нагрева и движения частиц в плазменной струе, их взаимодействие с окружающей средой, поверхностью основы и в целом качество напыляемого покрытия, его эксплуатационные характеристики.

1.1.3 Концепции комплексного моделирования процессов плазменного напыления покрытий

Совершенствование существующих и разработка новых технологий плазменного напыления связаны со значительными проблемами, обусловленными трудностями в экспериментальном измерении технологических параметров, вследствие высоких температур и скоростей протекания теплофизических и динамических процессов в плазменной струе. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является применение методов компьютерного моделирования плазменного напыления, при которых возможно получение максимального объема информации об изучаемом процессе при минимуме экспериментальных исследований.

На основании имеющегося опыта можно выделить следующие основные направления дальнейшего развития и совершенствования моделирования процессов плазменного напыления.

1. Разработка математических моделей, реализующих 2– и 3–мерное описание теплофизических и динамических процессов, имеющих место при плазменном напылении.

2. Практическая реализация в компьютерных моделях принципа комплексного моделирования всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных.

3. Применения принципа имитационного моделирования, обеспечивающего приближение разработанных моделей к реальному процессу.

4. Учет при моделировании температурных зависимостей свойств плазмообразующих газов, материалов покрытий и оснований на всех стадиях процесса напыления.

5. Интеграция в состав программных комплексов, реализующих модели, баз данных свойств веществ, участвующих в процессе напыления, технологических режимов, параметров оборудования и другой информации, необходимой для комплексного моделирования.

6. Модульное построение программного комплекса с широким использованием технологии объектно-ориентированного программирования, позволяющей обеспечить гибкость в компьютерной реализации математических задач, открытую структуру комплекса с возможностью его совершенствования без изменения ранее разработанных блоков.

7. Введение в состав программных комплексов элементов экспертных систем для анализа результатов исследований и выбора наиболее оптимальных режимов изучаемых процессов.

Для пояснения концепции практической реализации приведенных выше принципов и направлений в моделировании плазменного напыления рассмотрим их применение к конкретным теплофизическим процессам, имеющим место на различных стадиях плазменного напыления покрытий.

Как видно из рис. 1.4, процесс плазменного напыления с этой точки зрения можно разбить на три основные стадии: 1) генерация плазменной струи; 2) ввод распыляемого порошка в плазменную струю, его нагрев и ускорение; 3) взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц порошка с основанием.

Предпосылками для организации комплексного моделирования указанных процессов являются обеспечение возможности сквозной передачи данных с одной стадии на другую и общность их структуры. Исходя из этого, входными данными для модели генерации плазмы будут конструктивные параметры плазмотронов, электрические характеристики, состав и массовый расход плазмообразующего газа, данные о температурной зависимости свойств. На выходе этой модели должно быть распределение температуры и скорости в незагруженной плазменной струе на участке от ввода частиц в плазменную струю до основания. Эти данные будут входными для модели 2-й стадии процесса наряду с информацией о массовом расходе напыляемого порошка, его размерах и свойствах, массовом расходе, составе и свойствах транспортирующего газа.

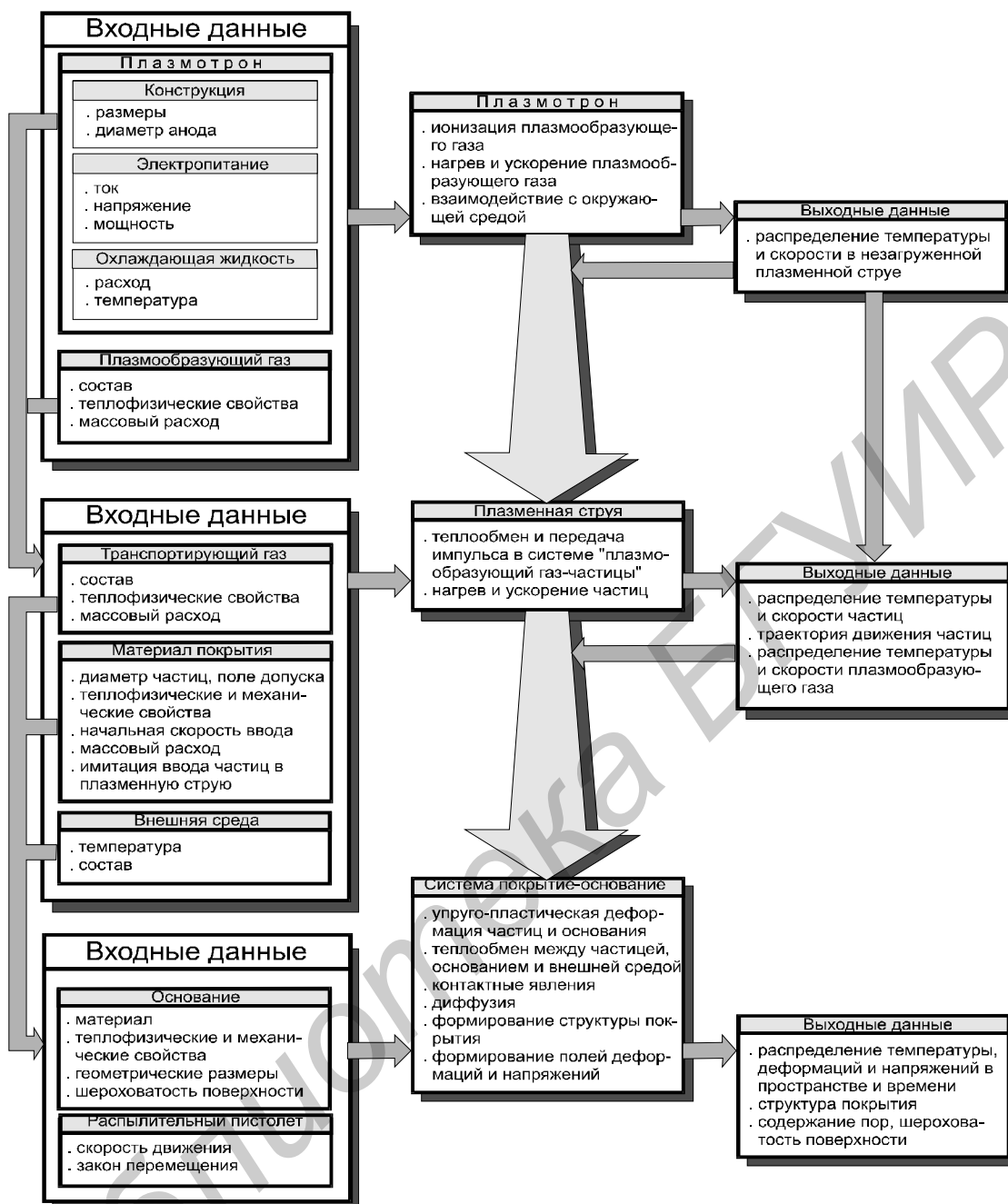


Рис. 1.4 Схема комплексного моделирования процесса плазменного напыления покрытий

На выходе модели плазменной струи будет массив данных о распределении во времени и пространстве температуры и скорости частиц и плазмообразующего газа. Кроме этого, входными данными для 3-й стадии процесса будут конфигурация, материал основания и его свойства; теплоотвод на устройства крепления; температура окружающей среды; толщина напыляемого покрытия и свойства материала; скорость и закон перемещения распылительного пистолета.

Результаты моделирования 3-й стадии процесса, являются информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при встрече с основанием; форма, размеры и координаты попадания в определенную точку основания; распределение температуры и остаточных напряжений в системе покрытие–основание.

При комплексном моделировании реализуется схема сквозной передачи данных от одной модели (стадии процесса) к другой и их динамическое изменение при вычислениях. Информация, общая для всех стадий моделирования, должна включаться в базу данных и использоваться каждой моделью по мере необходимости. В базе данных могут находиться также результаты промежуточных расчетов всех стадий процесса, что позволит при необходимости осуществлять независимое исследование какой-то отдельной стадии.

1.1.4 Особенности математического моделирования теплофизических процессов при плазменном напылении покрытий

Ввод частиц порошка в плазменную струю в соответствии с принятой концепцией моделируется (имитируется) посредством последовательности случайных чисел. Размер частиц порошка (d_{ps}) математически описан с помощью случайной переменной со средним значением $m = E(d_{ps}) > 0$ и дисперсией $s^2 = Var(d_{ps}) > 0$. Плотность вероятности распределения величины $d_{ps} \approx N(m, s^2)$.

Движение частиц порошка в плазменной струе описывается исходя из закона Ньютона:

$$m_p a_p = r_p \cdot \frac{\rho d_0^3}{6} \cdot \frac{dv_p}{dt} = \sum F \quad (1.1)$$

где: $\sum F$ – сумма сил, действующих на частицу в плазменной струе; V_p – скорость частицы; t – время; d – диаметр частицы; r_p – плотность частицы.

После преобразований с учетом граничных условий, получены аналитические выражения для расчета скорости и координаты частицы в направлении X и Y как функции времени.

Из текущей координаты частиц в плазменной струе и имеющегося в базе данных двухмерного распределения скорости и температуры в незагруженной плазменной струе решалась задача нагрева порошка из условий конвективного и лучистого теплообмена при ламинарном режиме обтекания. Эта задача описывается в зоне до начала плавления частицы следующим дифференциальным уравнением:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha F (T_g - T_p) - sF (T_p^4 - T_b^4) \quad (1.2)$$

где: m_p – масса частицы; c_p – теплоемкость частицы (Дж/кг.К); F_p – площадь поверхности частицы, m^2 ; $s = s_b \cdot e$ – приведенный коэффициент излучения; α – коэффициент конвективного теплообмена; T_p , T_g , T_b – температура частиц, плазменной струи и окружающей среды соответственно, К.

Время, необходимое для полного проплавления частицы, находилось из уравнения теплового баланса:

$$m_p \cdot L_p = F \int_{t_1}^{t_2} [\alpha (T_g - T_m) - sF (T_m^4 - T_b^4)] dt, \quad (1.3)$$

где L_p – энергия плавления материала частиц (Дж/кг); T_m – температура плавления частиц.

Поскольку согласно разработанной методике расчета, на единичных отрезках траектории не учитывалось влияние температуры на свойства веществ, то удалось получить аналитическое решение данных уравнений, что значительно упростило процедуры расчета и анализ модели.

В результате расчетов 2-й стадии процесса напыления определяется координата попадания каждой частицы на основание, ее температура и скорость в момент столкновения. Считая, что частицы перед попаданием на основание имеют шарообразную форму и находятся в жидком или размягченном состоянии, устанавливалась взаимосвязь между их начальной формой и формой после попадания на поверхность с помощью параметра, называемого степенью расплющивания, определенного из выражения: $x_m = \sqrt{A_A / A_0}$, где: A_A – площадь контакта расплющенной частицы (ламели) с основанием; A_0 – площадь, определяемая диаметром частицы.

Формирование структуры плазменных покрытий осуществляется на основе геометрического описание наложения ламелей друг на друга при столкновении

с основанием с образованием пор и определенного рельефа поверхности покрытия. Производится также расчет процентного содержания пор и параметров шероховатости поверхности покрытия (Ra , Rz). Каждой размещаемой частице присваивается условный цвет. В соответствии с ним заполняются ячейки формируемого массива данных структуры покрытия. Ячейкам, не заполненным ламелью, присваивается индекс “0” - моделирующий поры.

Модель теплопередачи в системе покрытие–основание разработана с применением метода конечных разностей. Рассматривался нагрев основания в процессе роста покрытия за счет конвективного и кондуктивного теплообмена (составляющая теплообмена излучением учитывалась косвенно в коэффициенте конвективного теплообмена вследствие ее малой величины). Обратная сторона основания может быть теплоизолирована или находиться в состоянии естественного конвективного теплообмена с внешней средой (задавалось граничными условиями).

Для формализации математической модели покрытие и основание разбивались на дискретные участки. При этом интерфейсной зоне присваивалась величина 0. Границы участков в подложке увеличивались в положительную сторону (1,2,3, ... ,n), в покрытии - в отрицательную (-1, -2, ... , m). Количество участков дискретизации покрытия соответствовало числу ламелей, образующихся на подложке в процессе напыления. С целью упрощения процедуры численных расчетов в ламель объединялось n -е количество расплющенных частиц и решалась задача теплопроводности в одномерном виде. Рассчитывалась температура в точках сетки в более поздний момент времени $t + Dt$ с использованием неявных уравнений, полученных на основе дискретизации дифференциальных уравнений теплопроводности методом конечных разностей:

$$T_m^{p+1} = T_m^p + 2(Fo)(Bi)(T_b^p - T_m^p) + 2(Fo)(T_{m+1}^p - T_m^p), \quad (1.4)$$

где: Fo – критерий Фурье; Bi – критерий Био, T_m^{p+1} – температура в $p+1$ момент времени в m -й точке сетки.

Распределение температуры в покрытии и основании рассчитываются как функции времени и координат. Эти данные являются основой для моделирования напряжений и деформаций в процессе роста и остывания покрытий, которое осуществляется на основе основных положений теории температурных напряжений и механики сплошных сред. Так, в случае

двухмерного напряженного состояния, которое будет иметь место для бесконечно тонкой изотропной пластины, взаимосвязь между удлинением и напряжением представлено с помощью закона Гука. При условии отсутствия касательных напряжений и равенстве главных, уравнение напряженного состояния для плоского элемента может быть представлено в общем виде следующим образом:

$$\mathbf{e} = \frac{(1-\nu)}{E} \mathbf{S} + \mathbf{a}_T (T - T_0) = \mathbf{e}^F + \mathbf{e}^T, \quad (1.5)$$

где, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, α – температурный коэффициент линейного расширения.

В процессе вычислений система покрытие–основание разбивается на n –е количество элементов в соответствии с приходящими ламелями и уравнение (5) представляется в матричном виде.

При численном решении полученных уравнений находится зависимость напряжений в системе покрытие–основание от времени и координат, которые являются основой для оценки прочности сцепления покрытий с основанием и других качественных характеристик.

1.2 Программный комплекс для моделирования плазменного напыления покрытий “PLASMA”

Приведенные выше математические модели теплофизических процессов, имеющих место при плазменном напылении покрытий практически реализованы в программном комплексе (ПК) “PLASMA” (рис. 1.5).

ПК построен в соответствии с требованиями наиболее эффективной практической реализации разработанных моделей, сквозного моделирования, удобства работы для пользователей, универсальности и иерархичности. Для удовлетворения ряда требований создана особая, полностью открытая блочная архитектура, а также особый класс объекта данных, предназначенный для хранения и обработки данных независимо от их типа и размерности, инкапсулируя в себе всю информацию необходимую не только для их отображения в числовой или графической форме, но и для редактирования или работы с ними моделей.

Реализация этой архитектуры позволила интегрировать несколько последовательно активируемых моделей в одной программной оболочке и связать их в единый комплекс с помощью универсального протокола обмена данными с

возможностью подключения нескольких различных модулей отображения и редактирования для каждого типа данных. При этом информация может быть получена из различных внешних источников и иметь практически любую реализуемую средствами языка C++ структуру.

В комплексе реализованы функции автоматического изменения размерностей данных и их типов, а также протокол сообщений об ошибках (в случае возникновения взаимных блокировок или ошибок в базе данных).

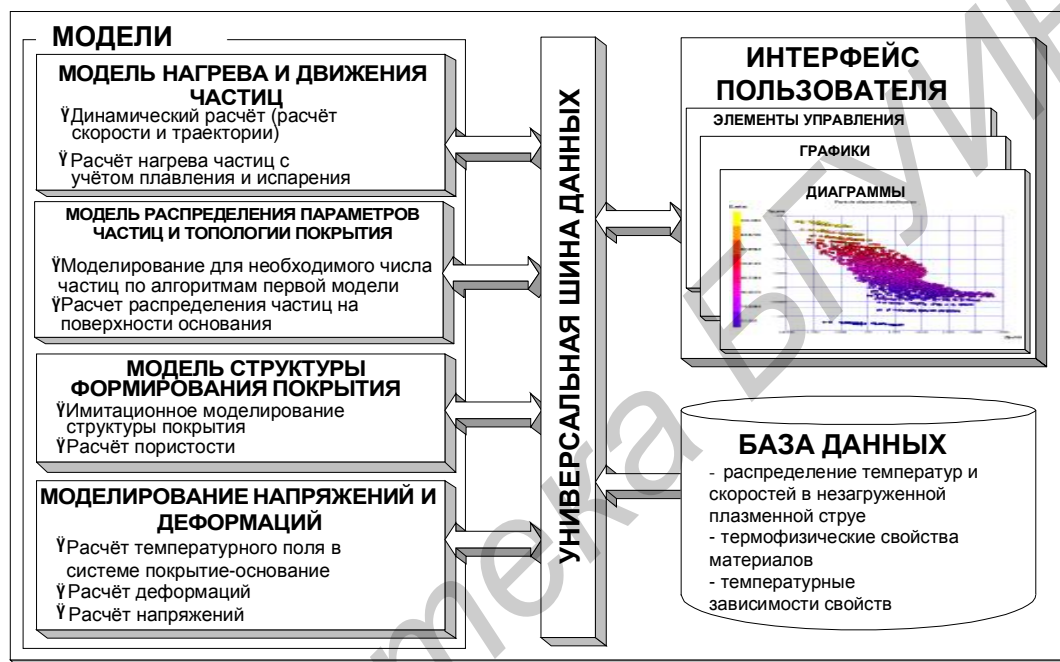


Рис. 1.5 Структурная схема программного комплекса **Plasma**

Открытая и реконфигурируемая архитектура ПК “PLASMA” позволяет подключать дополнительные модели, вводить в ПК новые типы данных; подключать другие модули отображения результатов моделирования; обращаться к другим внешним источникам информации и т.д. При этом модернизация ПК производится без внесения существенных изменений в другие модули системы.

Созданная и включенная в состав программного комплекса база данных материалов напыляемых порошков, оснований и плазмообразующих газов, распределений скорости и температуры незагруженной плазменной струи, содержит, в отличие от известных разработок, сведения о температурной зависимости свойств, предоставляя пользователям возможность использования нескольких видов аппроксимаций этих зависимостей (кусочно-линейная и несколько сплайновых аппроксимаций).

1.3 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант 1

Исследовать влияние диаметра частиц порошка Al_2O_3 на траекторию движения и температуру нагрева частиц в плазменной струе. Определить оптимальную дистанцию напыления ($D = 20; 40; 60$ мкм)

Вариант 2

Исследовать влияние начальной скорости ввода частиц порошка на содержание пор в покрытии ($V = 5; 10; 20$ м/с)

Вариант 3

Исследовать влияние толщины напыляемого покрытия на распределение напряжений и температур в полученном после моделирования покрытии. ($H = 80; 140; 200$ мкм)

Варианты выполняются для двух материалов.

А) оксидное покрытие Al_2O_3 ;

Б) гетерное покрытие Ti .

1.4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по работе и инструкцию пользователя ПК Plasma (входит в состав электронного учебного методического комплекса к работе).
2. Получить у преподавателя номер индивидуального задания.
3. В соответствии с руководством пользователя запустить программный комплекс Plasma_Lab.
4. Ответить на вопросы коллоквиума.
5. Ознакомиться с индивидуальным заданием.
6. Ввести и отредактировать исходные данные для моделирования в соответствии с индивидуальным заданием.
7. Произвести расчет и получить зависимости в графическом виде.
8. Провести анализ результатов с выработкой рекомендаций по оптимальным режимам плазменного напыления.

1.5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Индивидуальное задание.
4. Результаты моделирования. С распечатками исходных данных и результатов моделирования в графической форме.
5. Анализ результатов.
6. Выводы и рекомендации.

1.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите области применения процесса плазменного напыления покрытий в электронной технике.
2. Требования предъявляемые к изоляционным покрытиям.
3. Требования предъявляемые к гетерным покрытиям.
4. Назовите перспективные конструкции КПУ МГП.
5. Какой материал наиболее перспективен для применения в качестве гетерных покрытий.
6. Какой материал применяется наиболее широко в качестве изоляционных покрытий.
7. Сущность плазменной технологии нанесения покрытий.
8. Приведите достоинства процесса плазменного напыления.
9. Основное технологическое оснащение процесса плазменного напыления.
10. Последовательность этапов моделирования процесса плазменного нанесения покрытий.
11. Физические законы, формализуемые моделью нагрева частиц в плазменной струе.
12. Физические законы формализуемые моделью теплообмена в системе покрытия-основание.
13. Каким численным методом решаются дифференциальные уравнения в разработанных моделях.
14. Каким образом в моделях учитывается температурная зависимость свойств веществ.

15. Структура программного комплекса для моделирования процесса плазменного напыления.

16. Назовите модели входящие в комплекс.

17. Какой из факторов может вносить наибольшую погрешность в результаты моделирования?

Литература к лабораторной работе №1

1. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С. П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко и др. Мн.: Бестпринт, 1998. – 211с.

2. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники / А.П. Достанко, С.П. Кундас, С.В.Бордусов и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко и П.А. Витязя В 3 т. Т. 1. – Мн.: ФУАинформ, 2000.- 424 с.

3. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3 т. Т.3. / А.П. Достанко, С.П. Кундас, С.В.Бордусов и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Мн.: ФУАинформ, 2001.- 263 с.

4. Кундас С.П., Ланин В.Л., Ануфриев Л.П. Моделирование технологических процессов производства РЭС и ЭВС: : Учеб. пособие по курсам «Технология ЭВС», «Технология РЭУ и автоматизация производства». – Мн.: БГУИР, 2000.- 155 с.

5. Кундас С.П., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие в 2 ч. Ч 1. – Мн.: БГУИР, 2002. – 164 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛЮЩЕНИЯ ЛЕНТ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с процессом ультразвукового плющения лент из тугоплавких металлов, применяемых в электронной технике. Изучение методики компьютерного моделирования процесса ультразвукового плющения и применяемых для этих целей программных средств, проведение численных исследований.

2.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Тугоплавкие металлы и их применение в технологии электронных приборов

Тугоплавкие металлы и сплавы находят в настоящее время широкое применение в различных отраслях техники и прежде всего там, где требуется обеспечение формоустойчивости при высоких температурах, термостабильности, стойкости к воздействию агрессивных сред. По информации фирмы "Plansee", одной из крупнейших в мире по производству изделий из тугоплавких металлов и сплавов и других источников, эти материалы и, в особенности, вольфрам, молибден и сплавы на их основе находят наибольшее применение в электронике, электротехнике, приборостроении, микроэлектронике (рис. 2.1) и, в частности, для изготовления ответственных деталей электронных ламп (мощные генераторные приборы (МГП), лампы бегущей и отраженной волны (ЛБВ, ЛОВ), галогенных ламп накаливания, катодно-подогревательных узлов.

Особый интерес в новых разработках МГП уделяется созданию катодно-подогревательных узлов с залитыми и многослойными структурами, что связано с резким снижением перепада температур между катодом и подогревателем, их монолитностью, вибро- и ударопрочностью и в целом высокой надежностью и долговечностью.

В приборостроении тугоплавкие материалы применяются для изготовления ответственных деталей рентгеновских приборов для испытания материалов (молибденовые чашки, шайбы), газотеплообменников и других конструктивных элементов магнитогидродинамических испытательных устройств (вольфрам), диафрагмы ионных ускорителей (вольфрам), электродов и эмитеров квантовых генераторов и ионных обрабатывающих устройств (вольфрам), игл матричных печатающих устройств компьютеров (вольфрамовая проволока).

Таким образом, видно, что для электроники требуется большое количество разнообразных деталей (с различной формой и размерами) из тугоплавких металлов и сплавов. Однако, наряду с широким применением и комплексом незаменимых во многих случаях эксплуатационных свойств, эти материалы отличаются низкой технологичностью в процессах обработки различными способами. Они имеют высокие прочностные характеристики, высокую твердость, склонность к образованию трещин и расслоений при деформировании в холодном состоянии и интенсивному окислению при нагреве на воздухе.

2.1.2 Описание способа ультразвукового плющения лент и применяемого оборудования

Для изготовления различных изделий электронной техники и приборостроения из тугоплавких металлов и сплавов в настоящее время наиболее широко применяются методы обработки давлением (волочение, прокатка, плющение, штамповка) и электрофизические методы обработки (ультразвуковое резание, электроэрозионная обработка, лазерная обработка, плазменное напыление). Из названных выше методов наиболее значительные трудности для практического применения представляют методы обработки давлением. В этом отношении наибольшей сложностью отличается процесс изготовления лент методом плющения круглых проволок, при котором в деформируемом металле формируется неравномерное напряженно-деформируемое состояние и на кромках лент практически всегда возникают растягивающие напряжения. Кроме этого, отечественная промышленность выпускает в основном проволоку невысокой степени чистоты по примесям внедрения, что в комплексе обуславливает низкий процент выхода продукции в процессах плющения. Поэтому, учитывая широкое применение лент из тугоплавких металлов и сплавов в электронной технике, в настоящей работе основное внимание было уделено исследованиям процесса изготовления изделий в виде лент и ленточных спиралей.



Рис. 2.1 Применение тугоплавких материалов

В частности, в основу способа горячего ультразвукового плющения в вакууме (ГУПВ) положена идея использования инструментов, колеблющихся с

ультразвуковой частотой для двухстороннего пластического деформирования в условиях вакуума проволок, нагретых до температур начала рекристаллизации металла (рис. 2.2), что соответствует обоснованным выше оптимальным условиям обработки давлением тугоплавких металлов и сплавов. При плющении проволок микронных сечений деформирование можно осуществлять практически только за счет энергии ультразвуковых колебаний. Режим импульсного деформирования проволок позволяет решить основную проблему горячей прокатки в вакууме – интенсивное адгезионное взаимодействие обрабатываемого металла с инструментами.

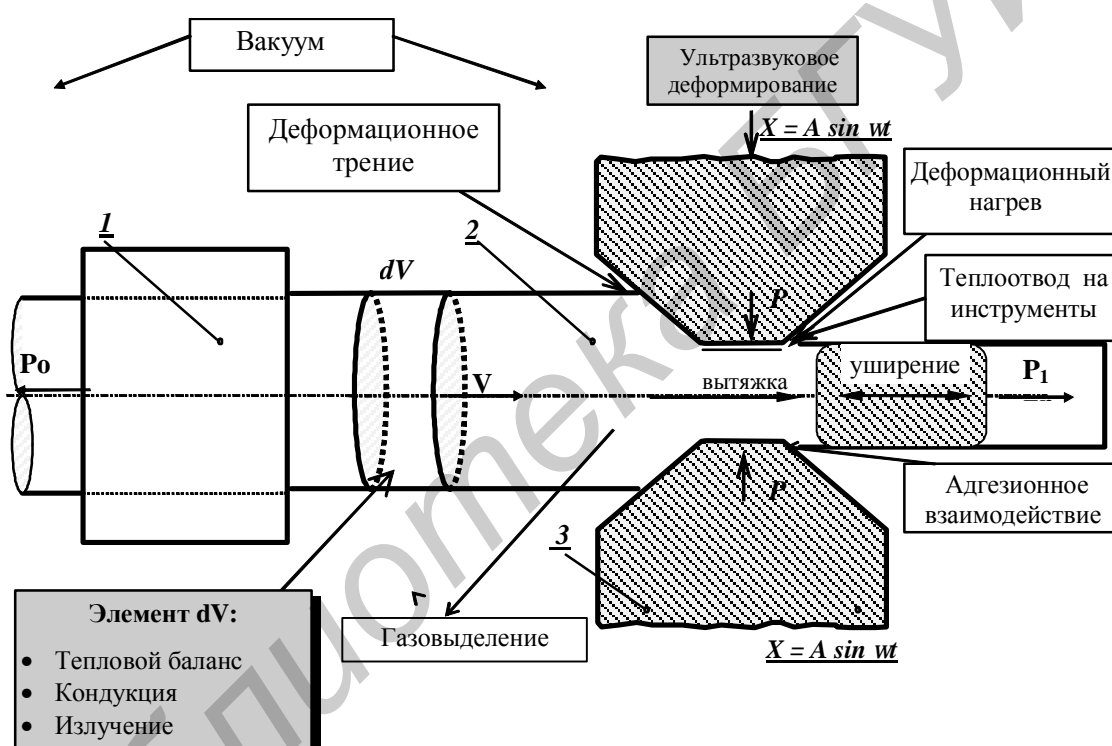


Рис. 2.2 Схема процесса горячего ультразвукового плющения в вакууме (1 – нагреватель, 2 – проволока–лента, 3 – ультразвуковые инструменты).

2.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛЮЩЕНИЯ

2.2.1 Особенности математического моделирования процесса ультразвукового плющения

Совершенствование и развитие технологии ультразвукового плющения с применением натуральных экспериментальных исследований связана со значительными потерями дорогостоящих и дефицитных металлов и сплавов.

Одним из эффективных путей решения данной проблемы является применение методов компьютерного моделирования, которые позволяют, при разработке адекватной модели процесса, проводить его исследование и оптимизацию при минимальном количестве дорогостоящих экспериментальных работ.

Анализ физических процессов имеющих место при ультразвуковом плющении, позволил разработать общую схему их моделирования и определить потоки передаваемых данных (рис. 2.3). Как видно из приведенной схем основными стадиями процесса являются:

- 1) предварительный нагрев проволоки перед плющением за счет косвенного инфракрасного или прямого резистивного нагрева;
- 2) непосредственно ультразвуковое плющение проволоки;
- 3) охлаждение полученной ленты.

Основой математического описания физических процессов, согласно предложенной схемы, являются законы термодинамики, теплофизики, механики твердого деформируемого тела. Хотя для каждого из процессов имеются свои особенности в их применении.

Упрощение математического описания физических процессов и их компьютерной реализации может быть достигнуто за счет применения комплексных численно–аналитических методов решения задач, что позволяет также учесть основной нелинейный фактор в уравнениях, описывающих процессы - это изменение свойств веществ в зависимости от температуры.

Для процесса ультразвукового плющения математически описаны и интегрированы в комплексную модель следующие физические процессы: нагрев проволок перед деформированием, кинематика взаимодействия и теплообмен обрабатываемого металла с инструментами, энергосиловые характеристики деформирования металла, напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации.

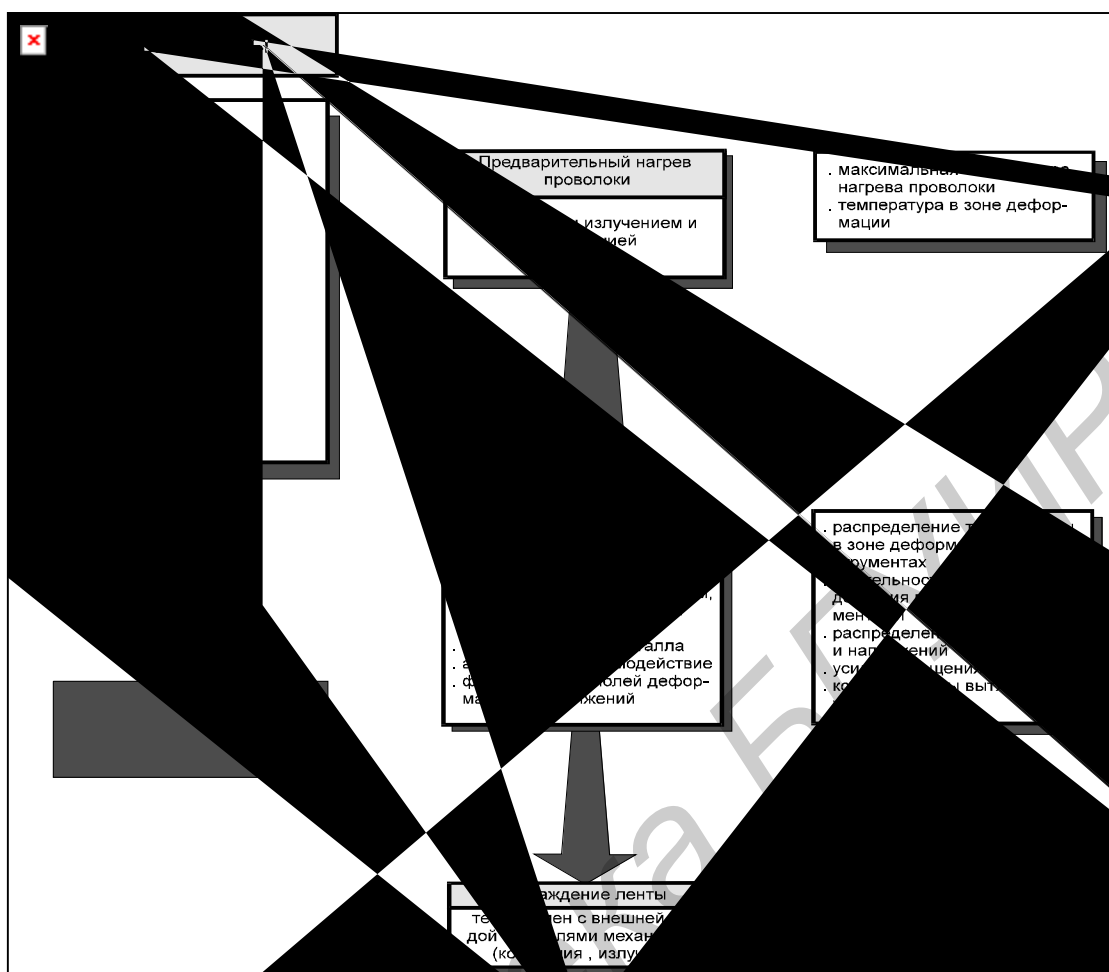


Рис. 2.3 Схема комплексного моделирования процесса ультразвукового плющения лент

Задача нагрева проволок из тугоплавких металлов и сплавов в условиях вакуума описана математически с помощью уравнения теплопроводности, являющегося частным случаем уравнения Навье-Стокса:

$$rc \left(V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = l \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

где: r — плотность материала, кг/м^3 ; c — удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; V — скорость движения проволоки, м/с ; T — функция распределения температуры, К ; x — координата, м ; t — время, с ; l — теплопроводность материала, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Решение поставленной задачи осуществлялось с применением метода конечных элементов. При этом, для нахождения вектора узловых значений исследу-

двумя функциями, применен метод Галеркина, с помощью которого исходное уравнение (3.1) представлено в матричном виде:

$$[C] \left(\frac{\int \{T\}}{\int t} + V \frac{\int \{T\}}{\int x} \right) + [K] \{T\} + \{F\} = 0 \quad (2.2)$$

где: $[C]$ — матрица теплоемкости, $[K]$ — матрица теплопроводности, $\{T\}$ — вектор узловых температур, $\{F\}$ — вектор нагрузки.

Данное уравнение решено с помощью итерационной схемы с использованием экспериментальных данных распределения температуры вдоль зоны ИК-нагревателя. Аналогичная методика была использована при разработке модели резистивного нагрева проволоки, который практически применяется при плющении проволок относительно больших диаметров (более 0.2 мм). Уравнение теплового баланса в данном случае составлено на основе закона Джоуля-Ленца.

Результатом решения данной задачи являются значения максимальной температуры нагрева проволок и температуры в очаге деформации как функции времени и координат.

Анализ формоизменения исходной заготовки при ультразвуковом плющении проводился на основании принципа радиальных течений. При этом соотношение между уширением и вытяжкой ленты определяется соотношением длины и ширины контактной площадки. Для учета особенностей процесса ультразвуковой ковки введено понятие эффективной длины контакта. Обработка полученных экспериментальных данных расширения лент при УЗ ковке показала, что между эффективной l_3 и реальной l_0 длиной контакта существует соответствие:

$$l_3 \approx l_0 - 0,7d \quad (2.3)$$

где d – диаметр исходной проволоки.

С учетом этого соотношения получены выражения для расчета ширины контакта и ширины ленты при плющении заготовок в виде круглой проволоки и прямоугольной ленты бойками с произвольным углом захода и шириной калибрующей площадки.

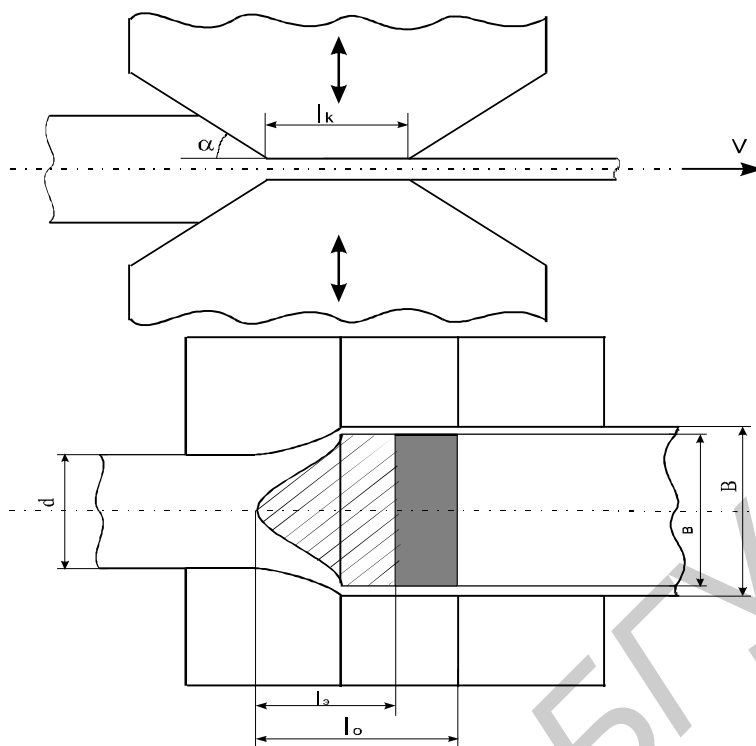


Рис. 2.4 Схема очага деформации

При плющении круглой проволоки ширина контакта определяется по формуле:

$$b = d \frac{\frac{l_o}{d} \left[1 - \frac{2}{p} \arcsin(1-e) + \frac{2}{p} (1-e) \sqrt{2e-e^2} \right] + \sqrt{2e-e^2}}{1 + \frac{4}{p} (1-e) \frac{l_o}{d}} \quad (2.4)$$

где e - степень обжатия.

Ширина ленты найдена из предположения постоянства кривизны ее боковой поверхности

$$B = b + d \left(1 - \sqrt{2e - e^2} \right) \quad (2.5)$$

Анализ упругих характеристик очага деформации показал, что основной вклад в общую величину упругой деформации вносит упругая деформация инструментов. Она в свою очередь складывается из прогиба поверхностей и объемной деформации инструментов. Величина прогиба поверхностей определяется распределением контактных напряжений. Для оценки прогиба применена модель инструмента в виде упругого полупространства. Установлено, что объ-

емная деформация инструментов не зависит от закона распределения контактных напряжений по поверхности и определяется только силой давления заготовки, поэтому для ее расчета применена модель на основе объемной жесткости инструмента. Величина объемной жесткости может быть определена экспериментально.

На основании экспериментальных данных для некоторых вариантов конструкции бойков определена величина их объемной жесткости. Установлено, что жесткость бойков в значительной степени зависит от размеров твердосплавной вставки и способа ее крепления.

При анализе кинематики процесса ультразвуковойковки для описания силового контактного взаимодействия бойков с лентой принята упруго-пластическая модель. В соответствии с принятой характеристикой сила плющения, равная вертикальной составляющей силы давления, может быть описана выражением:

$$P_y(u) = \begin{cases} 0, & \text{при } u < 0; \\ P_0 \frac{u}{d}, & \text{при } 0 < u < d; \\ P_0, & \text{при } u > d; \end{cases} \quad (2.6)$$

где u – расстояние между поверхностью бойка и недеформированной поверхностью заготовки; P_0 – сила осадки заготовки; d – величина упругой деформации.

Анализ сил, действующих на участок ленты в очаге деформации, показал, что движение ленты происходит прерывисто. В каждом элементарном циклековки в момент обжатия лента стопорится в очаге деформации и продолжает свое движение после снятия нагрузки. Учитывая высокую частоту силовых импульсов, закон движения ленты находился с учетом конечной скорости распространения продольной ультразвуковой волны в проволоке и ленте.

Для полубесконечного стержня, каким можно считать участок ленты по одну сторону от очага деформации, сила P , приложенная к торцу, и скорость движения этого сечения связаны соотношением:

$$v = \frac{cP}{ES}, \quad (2.7)$$

где $c = \sqrt{E/r}$ – скорость распространения упругой волны в стержне; E – модуль продольной упругости; r – плотность материала; S – площадь сечения.

В результате проведенного анализа выделено шесть фаз элементарного циклаковки:

I фаза – упругая разгрузка неподвижной ленты.

II фаза – упругая разгрузка со скольжением ленты.

III фаза – раздельное движение бойков и ленты (контакт отсутствует).

IV фаза – упругое сжатие со скольжением ленты.

V фаза – упругое сжатие неподвижной ленты.

VI фаза – пластическая осадка (ковка ленты).

Исходя из принятой характеристики силового взаимодействия (2.6), с учетом распространения ультразвуковой волны в ленте (2.7) и синусоидального закона колебательного движения бойков получены уравнения, связывающие длительность фаз плющения, кинематические и силовые параметры процесса.

Длительность каждой фазы процесса не может быть выражена в элементарных функциях, поэтому для моделирования применены численные методы и разработан алгоритм, согласно которому определяются длительность каждой фазы элементарного цикла деформирования, кинематические и силовые параметры всего процесса ультразвукового плющения.

Установлено, что основной ключевой параметр процесса плющения - это соотношение амплитуды ультразвуковых колебаний и величины упругой деформации. Если размах колебаний оказывается меньше величины суммарной упругой деформации, то процесс плющения переходит из режимаковки в режим волочения, что вызывает резкое увеличение силовых параметров обработки и ухудшает качество изготавливаемых лент. На границе перехода сила плющения равна половине силы осадки, а упругая деформация равна удвоенной амплитуде колебаний. Эта закономерность позволяет определять упругую деформацию и силу осадки в процессе плющения.

Анализ работы ультразвуковой колебательной системы установок плющения в условиях силового воздействия показывает, что силовое воздействие на колебательную систему приводит к повышению резонансной частоты и уменьшению резонансной амплитуды колебаний. Для расчета амплитуды установившихся колебаний в процессе плющения необходим один обобщенный параметр колебательной системы - динамическая жесткость.

Для расчета динамической жесткости колебательных систем сложной формы применен метод прогонки. Для учета потерь на внутреннее трение в колебательной системе использована модель вязкоупругого поведения Фойхта-Кельвина.

Представленные выше математические модели теплофизических и динамических процессов, имеющих место при ультразвуковом плющении, практически реализованы в программном комплексе "ULTRASOUND".

2.3 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

При выполнении лабораторной работы необходимо с помощью программного комплекса **“UltraSound”** исследовать влияние технологических режимов ультразвукового плющения на выходные характеристики процесса. Для этого осуществляется расчет по каждой из переменных (факторов влияющих на процесс), а остальные должны быть выставлены в среднее значение.

Вариант 1

Исследовать влияние степени обжатия проволоки, угла захода инструмента, и длины калибрующей площадки на ширину получаемой ленты. ($\epsilon = 0-0.8$; $\alpha=8-12^\circ$; $l=0.5-1.5\text{мм}$);

Вариант 2

Исследовать влияние степени обжатия проволоки, угла захода инструмента, и длины калибрующей площадки на усилия осадки и упругую деформацию ленты. ($\epsilon = 0-0.8$; $\alpha=8-12^\circ$; $l=0.5-1.5\text{мм}$)

Вариант 3

Исследовать влияния амплитуды ультразвуковых колебаний, степени обжатия проволоки на усилия плющения и усилие протяжки ленты. ($A = 2-10$ мкм; $\epsilon = 0-0.8$; $\alpha=8-12^\circ$;))

Вариант 4

Исследовать влияние скорости протяжки и угла захода инструмента на усилие плющения и усилие протяжки ленты. ($V = 0; 10, 20$ м/мин; $\alpha=8-12^\circ$;))

Варианты выполняются для двух материалов.

А) Вольфрам – W ($\varnothing = 0.3$ мм)

Б) Молибден – Mo ($\varnothing = 0.3$ мм)

2.4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Схема работы программы представляется следующим шагами

1. Запустить обучающую программу к лабораторной работе Us_Lab.

2. Ознакомиться с теоретическими сведениями и руководством пользователя программного комплекса Ultrasound (входит в состав электронного учебного методического комплекса к работе).
3. Ответить на вопросы коллоквиума.
4. Ознакомиться с индивидуальным заданием.
5. Вызвать моделирующую программу моделирования “USWin”.
6. Выбрать и загрузить математическую модель в соответствии с индивидуальным заданием.
7. Ввести данные для расчета в соответствии с индивидуальным заданием.
8. Произвести моделирование и получить результаты (в текстовом и графическом виде).
9. Проанализировать данные. По результатам моделирования сделать выводы и дать рекомендации по оптимальным режимам ультразвукового пющения.

2.5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Индивидуальное задание.
4. Результаты моделирования, с распечатками исходных данных и результатов моделирования в графической форме.
5. Анализ результатов.
6. Выводы и рекомендации.

2.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для изготовления каких изделий электронных приборов применяются тугоплавкие металлы и сплавы?
2. Какие тугоплавкие металлы находят широкое применение в технологии электронных приборов?
3. Назовите основные свойства определяющие необходимость применения тугоплавких материалов для изготовления деталей мощных генераторных приборов.
4. Какие свойства тугоплавких лент определяют их низкую технологичность в процессе обработки?
5. Сущность способа ультразвукового пющения.

6. Принцип действия установки "Мустанг".
7. Приведите достоинства применения процесса горячего ультразвукового плющения в вакууме проволок из тугоплавких металлов.
8. Основные стадии процесса ультразвукового плющения.
9. Как учитывается температурная зависимость свойств материалов при моделировании?
10. Назовите основные фазы элементарного циклаковки.
11. Назовите основные параметры плющения, оказывающие наибольшее влияние на силовые характеристики?
12. Назовите основные параметры плющения, оказывающие наибольшее влияние на точность лент?
13. В чем заключается концепция сквозного моделирования процесса ультразвукового плющения?
14. Какое влияние оказывает упругая деформация инструментов на процесс ультразвукового плющения?
15. Структура программного комплекса для моделирования процесса ультразвукового плющения?
16. Какие математические модели реализованы в программном комплексе?
17. Какие виды теплообмена учитываются в модели ИК нагрева проволоки?
18. На каком принципе основан анализ формоизменения исходной заготовки при ультразвуковом плющении?
19. Какая модель принята при анализе кинематики процесса ультразвукового плющения?
20. От чего зависит объемная деформация инструментов?

Литература к лабораторной работе №2

1. Кундас С.П., Вышинский Н.В., Тявловский М.Д. Ультразвуковое плющение лент из тугоплавких металлов, применяемых в электронной технике и приборостроении. Под редакцией академика НАН Беларуси А.П.Достанко – Мн.: Бестпринт, 2001.- 296 с.
2. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т. 1 / С.П. Кундас, В.Л. Ланин М.Д. Тявловский, А.П.Достанко. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко.– Мн.: Бестпринт, 2002.- 401 с.
3. Кундас С.П., Ланин В.Л., Ануфриев Л.П. Моделирование технологических процессов производства РЭС и ЭВС: : Учеб. пособие по курсам «Технология

ЭВС», «Технология РЭУ и автоматизация производства». – Мн.: БГУИР, 2000.- 155 с.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРЕ- И ПОСТПРОЦЕССОРОВ СОВРЕМЕННЫХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение функциональных возможностей и особенностей построения пре- и постпроцессоров конечноэлементных программных комплексов для моделирования технологических систем на примере ПК **ThermoSim**, предназначенного для моделирования процессов термообработки. Построение конечноэлементных моделей деталей с использованием **ThermoSim**.

3.1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1.1 Современные программные средства, применяемые для моделирования ТС

Программные средства для моделирования технологических систем относятся к системам компьютерного инженерного анализа (Computer Aided Engineering - CAE). Чаще всего общим для современных CAE-систем является типовая структура, основанная на реализации трех основных подсистем (блоков) (рис. 3.1):

- препроцессора (формирования входной информации);
- процессора (анализа);
- постпроцессора (формирования выходной информации).

В этой структуре возможна также реализация внешней или внутренней базы данных (БД).

При моделировании сложных технических объектов возникают проблемы, связанные со сложностью подготовки большого количества исходной информации и с трудностью ее проверки и корректировки. При ручной подготовке такого объема исходных данных неизбежно появление ошибок.

Поэтому усилия разработчиков CAE-приложений в последние годы были направлены на создание и совершенствование подсистем автоматизированной подготовки топологической информации, основу которых составляют программы, называемые препроцессорами. Препроцессоры либо непосредственно

включаются в состав программных комплексов, реализующих определенный численный метод, либо существуют в виде автономных программ.

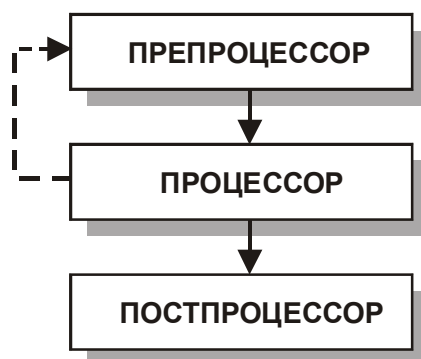


Рис. 3.1 Общая блок-схема взаимосвязи между основными элементами современного программного комплекса

Блок процессора непосредственно осуществляет математические операции обработки исходных данных, а также может выполнять некоторые вспомогательные действия, например, такие как автоматическое переразбиение сети элементов (эта функция может существовать и в виде отдельного программного модуля), уменьшение или увеличение временного шага расчета, ввод дополнительных инкрементов и так далее. Вид математической обработки исходных данных зависит от типов решаемых задач при моделировании технологических систем, а точнее от их математических моделей (систем уравнений).

В блоке постпроцессора осуществляется интерпретация и представление в необходимой форме результатов моделирования, например наглядное графическое распределение по поверхности и в объеме (сечении) модели полей температур, перемещений и других физических величин, построение графических и табличных зависимостей величин от времени, друг от друга и т.п. Постпроцессоры также используются для создания отчетов и презентаций.

База данных в САЕ-приложениях может быть реализована в виде отдельного программного модуля с использованием СУБД и специального графического интерфейса, либо интегрирована в программный комплекс с возможностью чтения данных из файла определенного формата.

3.1.2 Структура ПК ThermoSim. Особенности построения пре- и постпроцессора

ПК ThermoSim (рис. 3.2) реализует комплексную модель процессов термообработки, особенностью которой является описание распределения температур, твердости и НДС в детали с учетом фазовых превращений, образования трещин, а также релаксации напряжений за счет пластических деформаций.

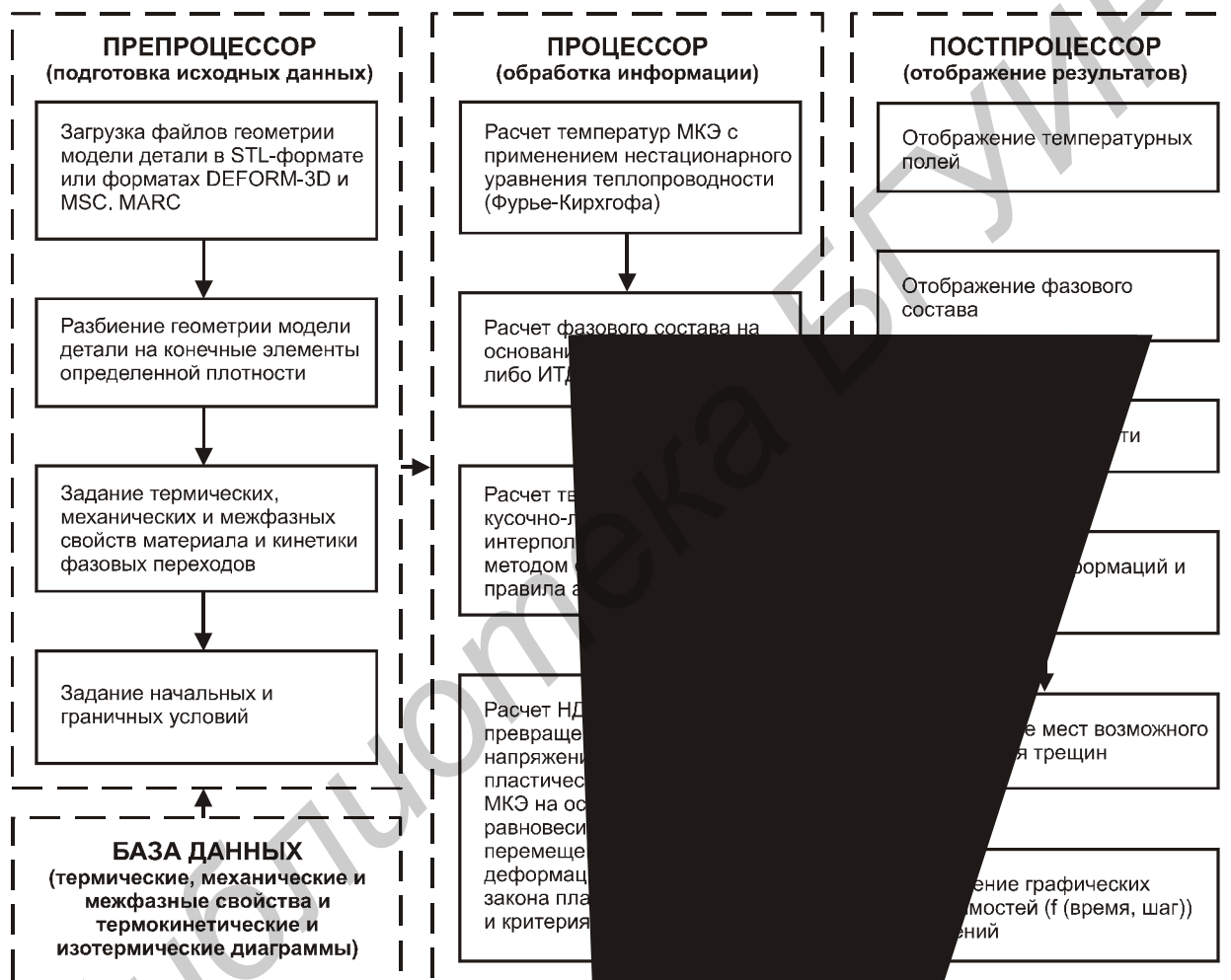


Рис. 3.2 Структура программного комплекса ThermoSim

Укрупненный алгоритм работы программного комплекса заключается в следующем:

Посредством *препроцессора*, помимо отображения, вращения и масштабирования модели детали на экране дисплея, производится подготовка исходных данных для расчета:

- загрузка тестового файла проекта, содержащего информацию о модели для выполнения расчета;
- загрузка файлов геометрии модели детали в стереолитографическом STL-формате или форматах сторонних производителей коммерческих программных комплексов DEFORM-3D и MSC. MARC;
- разбиение геометрии модели детали на конечные элементы определенной плотности при помощи специального модуля конечноэлементного разбиения;
- задание термических, механических и межфазных свойств материала, задаваемых как непосредственно в препроцессоре, так и конвертируемых из внешней БД, и кинетики фазовых переходов, конвертируемых из БД;
- задание начальных, учитывающих распределение начальной температуры, и граничных условий, учитывающих конвективный и лучистый механизмы теплообмена;
- задание параметров процесса;
- сохранение текстового файла проекта, содержащего информацию о модели для выполнения расчета.

Процессором выполняется обработка информации:

- загрузка определенной информации из файла проекта, сформированного препроцессором;
- расчет температур МКЭ с применением нестационарного уравнения теплопроводности (Фурье-Кирхгофа) с определенными начальными и граничными условиями;
- расчет фазового состава на основании аппроксимации ТКД, либо ИТД с применением упрощенной диффузионной функции, уравнения Авраами и упрощенного уравнения Мэги;
- расчет результирующей твердости методом кусочно-линейной интерполяции зависимости твердости от скорости охлаждения или шаговым методом с использованием правила аддитивности;
- расчет НДС с учетом фазовых превращений и релаксации напряжений за счет пластических деформаций МКЭ на основании уравнения равновесия, связи перемещений и деформаций и напряжений, закона пластического течения и критерия текучести Мизеса;
- сохранение результатов расчетов в бинарный файл (расчетную БД).

Постпроцессором, помимо отображения, вращения и масштабирования модели детали на экране дисплея, выполняется отображение результатов:

- загрузка файла, содержащего результаты расчетов и созданного процессором;
- отображение по поверхности и в объеме модели детали температурных полей, фазового состава, результирующей твердости, деформаций, напряжений и мест возможного образования трещин посредством набора функций для просмотра и анализа результатов моделирования цветовыми полями на определенных временных шагах;
- построение графических зависимостей от времени и шага расчета, а также сечений геометрии модели детали посредством набора вышеуказанных функций.

База данных содержит информацию о физических свойствах различных сталей, а также термокинетические и изотермические диаграммы для расчета твердости деталей при термообработке.

Пре-процессор состоит из модулей работы с базой данных, ввода данных о процессе, взаимодействия с КЭ процессором, работы с проектом и ввода геометрических данных. Постпроцессор – из модулей отображения графиков, экспорта данных и отображения градиентов. Пре- и постпроцессор обмениваются данными с двумя общими модулями: модулем внутреннего представления данных и модулем работы с геометрией. Благодаря этому отсутствует непосредственное взаимодействие пре- и постпроцессора, что позволит впоследствии легко модифицировать их программные интерфейсы, не исключая совместимость.

Кроме того, существуют различные виды взаимодействия между объектами внутри как пре- так и постпроцессора. Эти взаимодействия в большинстве случаев обрабатываются с помощью модуля внутреннего представления данных.

3.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения к лабораторной работе и ознакомиться с руководством пользователя программного комплекса ThermoSim (входит в состав электронного учебного методического комплекса к работе).
2. Получить у преподавателя номер индивидуального задания
3. Запустить на выполнение исполнительный файл обучающей программы к лабораторной работе

4. Сдать электронный коллоквиум по лабораторной работе.
5. Ознакомиться с индивидуальным заданием.
6. Провести исследования в соответствии с индивидуальным заданием (см. раздел «Индивидуальные задания»).
7. Оформить отчет по лабораторной работе.

3.3 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Вариант 1

Создание модели для исследования влияния скорости охлаждения на фазовый состав и твердость после закалки.

Тип детали	Вал
Материал	Сталь 45
Начальные условия	Температура детали - 840 С Фазовый состав - 100 % аустенита
Граничные условия	Температура воды - 12 С Температура воздуха - 18 С Коэффициент теплообмена с водой (для торца детали) - в виде зависимости от температуры поверхности Коэффициент теплообмена с воздухом (для всей остальной поверхности детали) - 0,015 (КВт/м ² С)
Параметры расчета	Адаптивный шаг по времени Минимальный шаг по времени - 0,005 с Максимальный шаг по времени - 10 с Конечная температура - 20 С Количество итераций - 1000

Коэффициент теплообмена с водой

Температура	850	800	770	732	690	649	579	530	486	409	350
Коэффициент теплообмена	1,5	2,2	3,2	5	8	12	20	25	30	33	32
Температура	305	250	227	190	163	138	107	86	57	40	30
Коэффициент теплообмена	29	23	20	15	12	10	7	5	2,8	1,8	1,5

Вариант 2

Создание модели для исследования влияния среды охлаждения (воздуха, воды и масла) на фазовый состав, твердость и остаточные напряжения после заковки

Тип детали	Пластина
Материал	Сталь 45
Начальные условия	Температура детали - 800 С Фазовый состав - 100 % аустенита
Граничные условия	Температура воздуха, воды и масла - 60 С Коэффициент теплообмена с водой - в виде зависимости от температуры поверхности Коэффициент теплообмена с маслом - в виде зависимости от температуры поверхности Коэффициент теплообмена с воздухом - 0,015 (КВт/м ² С)
Параметры расчета	Адаптивный шаг по времени Минимальный шаг по времени - 0,005 с Максимальный шаг по времени - 5 с Конечная температура - 25 С Количество итераций - 1000

Коэффициент теплообмена с водой

Температура	850	800	725	652	599	550	499	470	450	420	406
Коэффициент теплообмена	1,5	2	3,1	3,5	4	4,4	4,8	5	7	12	16
Температура	380	329	270	225	193	170	150	120	100	80	50
Коэффициент теплообмена	20	21	16	12	8	4	1	0,5	0,35	0,25	0,15

Коэффициент теплообмена с маслом

Температура	850	798	753	703	653	603	553	503	453	403	353
Коэффициент теплообмена	0,15	0,4	0,56	0,65	0,77	2,5	4,19	4,41	3,8	2,88	1,03
Температура	303	253	203	80							
Коэффициент теплообмена	0,38	0,32	0,25	0,12							

Вариант 3

Создание модели для исследования напряжений в процессе закалки

Исследуемые физические величины	Напряжения
Тип детали	Шестерня
Материал	Сталь 45
Начальные условия	Температура детали - 800 С Фазовый состав - 100 % аустенита
Граничные условия	Температура масла - 30 С Коэффициент теплообмена с маслом - в виде зависимости от температуры поверхности
Параметры расчета	Адаптивный шаг по времени Минимальный шаг по времени - 0,005 с Максимальный шаг по времени - 10 с Конечная температура - 40 С Количество итераций - 1000 шт.

Коэффициент теплообмена с маслом

Температура	850	798	753	703	653	60	553	503	45	403	353
Коэффициент теплообмена	0,15	0,4	0,56	0,65	0,77	2,5	4,19	4,41	3,83	2,88	1,03
Температура	303	253	203	80							
Коэффициент теплообмена	0,38	0,32	0,25	0,12							

Вариант 4

Создание модели для исследования влияния распределения температуры на фазовый состав в процессе закалки

Исследуемые физические величины	Температура и фазовый состав
Тип детали	Сателлит
Материал	Сталь 60
Начальные условия	Температура детали - 840 С Фазовый состав - 100 % аустенита
Граничные условия	Температура масла - 30 С Коэффициент теплообмена с маслом - в виде зависимости от температуры поверхности

Параметры расчета	Адаптивный шаг по времени Минимальный шаг по времени - 0,005 с Максимальный шаг по времени - 10 с Конечная температура - 35 С Количество итераций - 1000 шт.
-------------------	--

Коэффициент теплообмена с маслом

Температура	850	798	753	703	653	603	553	503	453	403	353
Коэффициент теплообмена	0,15	0,4	0,56	0,65	0,77	2,5	4,19	4,41	3,83	2,88	1,03
Температура	303	253	203	80							
Коэффициент теплообмена	0,38	0,32	0,25	0,12							

3.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Индивидуальное задание.
3. Описание результатов построения конечноэлементных моделей деталей.
4. Выводы и рекомендации.

3.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом в программном комплексе задается охлаждающая среда
2. Для чего необходимо производить закрепление детали
3. Каким образом и в каком окне можно задать начальную температуру детали
4. Возможно ли использование графического формата STL в программном комплексе
5. Каким образом вводится информация о свойствах материала
6. Какие граничные условия можно задать в программном комплексе
7. Какая информация отображается в окне состояния расчета
8. Назначение окна "Параметры" в режиме постпроцессора
9. Назначение окна "Выделение"
10. Какие ограничения можно применить к модели в окне "Параметры процесса"

11. Каким образом указывается вид моделируемого процесса (нагрев/охлаждение)
12. Состав программного комплекса ThermoSim
13. Назначение пункта меню Процесс->Рестарт
14. В каком режиме доступна функция построения сечений
15. В каком режиме доступна функция создания графиков
16. В каком режиме доступна функция выбора материала из базы данных
17. В каком режиме доступна функция разбиения поверхностной геометрии на конечные элементы
18. В каком режиме доступна функция отображения каркасной модели
19. Каким образом задается начальный фазовый состав материала
20. В каком случае необходимо указывать закрепление детали

Литература к лабораторной работе №3

1. Кундас С. П., Кашко Т. А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. - Мн.: БГУИР, 2002. - 164 с.: ил.
2. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Кашко Т. А., Гринчик Н. Н. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. - Мн.: БГУИР, 2003. - 182 с.: ил.
3. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение математических моделей теплофизических процессов, протекающих при закалке. Исследование процесса закалки с применением программного комплекса ThermoSim.

4.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

4.1.1 Общие сведения

Термообработку деталей производят для получения требуемых механических свойств (фазовый состав, напряженно-деформированное состояние (НДС) и твердость). Однако разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов термообработки металлических изделий различных отраслей техники связано с большими трудностями ввиду большого количества влияющих факторов и необходимости применения разрушающих методов контроля. В этой связи одним из эффективных направлений решения данной проблемы является применение методов компьютерного моделирования, с помощью которых возможно получение максимального объема информации об изучаемом процессе при минимуме дорогостоящих экспериментальных исследований. Наиболее перспективным при решении вышеперечисленных задач является применение математических моделей, построенных на основе метода конечных элементов (МКЭ). Преимущества МКЭ заключаются в том, что он позволяет рассчитывать детали сложной и неправильной формы с детализацией наиболее критичных мест изделия путем увеличения количества элементов разбиения в этих местах и довольно прост в реализации на ЭВМ [1, 2].

4.1.2 Виды термической обработки металла

Закалкой называется процесс термической обработки металла, состоящий в его нагреве и быстром (иногда постепенном) охлаждении. Применяется закалка для повышения твердости, прочности и износостойчивости металла.

Технология закалки следующая: изделие нагревают до определенной температуры (для каждого металла эта температура своя) и некоторое время выдерживают его при этой температуре. За это время изделие равномерно прогревается. Далее следует охлаждение. Охлаждают изделие в определенной среде (воде, растворе, масле или водо-воздушной смеси).

Отпуск закаленных деталей позволяет в некоторых пределах снизить их хрупкость, но так, чтобы не потерять приобретенной при закалке твердости. Низкий отпуск применяется в основном при обработке измерительного или режущего инструмента. Закаленную сталь при низком отпуске нагревают до 150 - 250 °С, выдерживают при этой температуре, а затем охлаждают на воздухе. После такой обработки хрупкость металла уменьшается, а приобретенная при закалке твердость сохраняется. Средний отпуск придает стали пружинящие свойства, при сохранении достаточно высокой прочности. При среднем отпуске заготовку нагревают до 300 - 500 °С и затем медленно охлаждают. Высокому отпуску подвергают заготовки, у которых нужно снять все внутренние напряжения и добиться высокой пластичности. Температура высокого отпуска – 500 - 600 °С.

Отжиг металла производят для снятия внутрикристаллического напряжения, вследствие чего уменьшается твердость металла. Чтобы вернуть металлу прежнюю пластичность, его периодически отжигают. Если для изготовления изделия используют ранее закаленный материал (например, новое изделие делают из другого, ранее закаленного предмета), то перед обработкой его тоже надо отжечь. Исправить погрешность предыдущей закалки также можно с помощью отжига. После отжига и выполнения необходимых кузнечных работ заготовку закаляют еще раз. Для полного отжига стали, ее нагревают до 900 °С (светло-красный цвет каления переходит в оранжевый) и выдерживают при этой температуре для прогрева по всему объему. Затем заготовку медленно охлаждают при комнатной температуре.

4.1.3 Математическая модель процесса закалки

Алгоритм математического моделирования теплофизических процессов при закалке стальных деталей представлен на рис. 4.1.

В процессе термической обработки стальных деталей в них происходят фазовые превращения. Т. к. фазы обладают разной плотностью, то при фазовых превращениях будут возникать напряжения, обусловленные различным изме-

нением объема. Кроме того, в результате фазовых превращений в объеме тела появляются поглощение и выделение тепла, обусловленные фазовыми превращениями. Следует также отметить, что каждая фаза обладает своими термическими и механическими свойствами, поэтому в каждой точке тела эти свойства будут зависеть от количества присутствующих фаз. Поэтому при решении тепловой задачи необходимо учитывать поглощение и выделение тепла, а при решении механической задачи – деформации, вызванные разными изменениями объемов фаз в детали в результате фазового превращения.

Определение распределения температур в детали в процессе закалки основано на решении уравнения теплопроводности:

$$C_V r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(l \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(l \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(l \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V, \quad (4.1)$$

где T – мгновенное значение температуры, в момент времени t в точке с координатами x, y, z ; C_V – коэффициент удельной теплоемкости материала; r – плотность материала; l – коэффициент теплопроводности материала; q_V – удельная мощность внутренних источников теплоты.

Граничные условия к уравнению теплопроводности:

$$-l \frac{\partial T}{\partial n} = a(T - T_\infty), \quad (4.2)$$

где n – внешняя нормаль к поверхности; a – коэффициент теплообмена поверхности тела с окружающей средой, определяемый из выражения:

$$\alpha = \alpha_k + \frac{\epsilon \sigma (T_\tau^4 - T_\infty^4)}{T_\tau - T_\infty}, \quad (4.3)$$

где ϵ – степень черноты тела; S – постоянная Стефана-Больцмана; T_∞ – температура окружающей среды, α_k – коэффициент конвективного теплообмена.

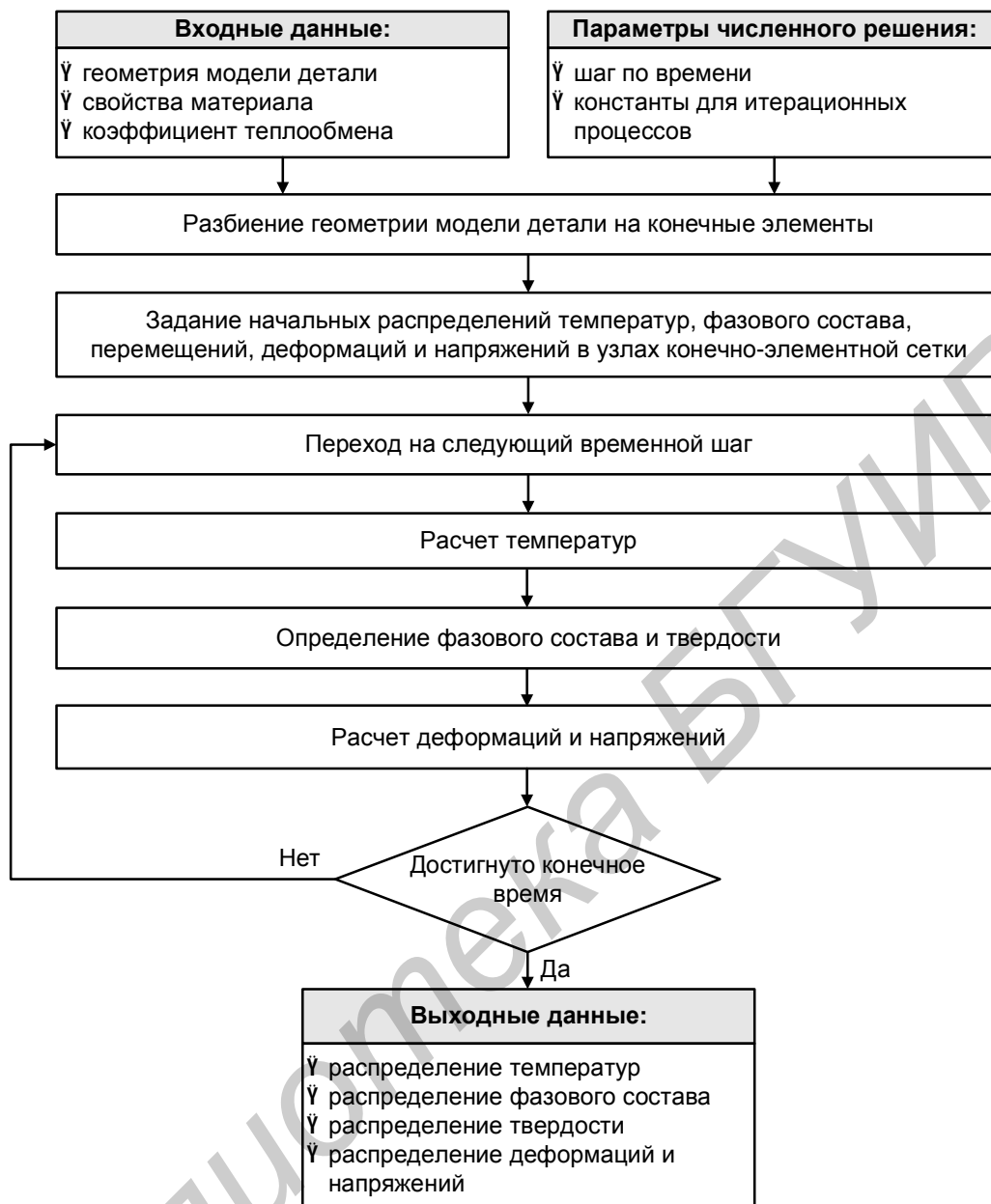


Рис. 4.1 Алгоритм комплексной модели теплофизических процессов при термообработке

Начальные условия задаются фиксированной температурой в начальный момент времени во всем объеме тела:

$$T(x, y, z) = T_0 \text{ при } t = 0. \quad (4.4)$$

Решая МКЭ уравнение теплопроводности с приведенными выше граничными и начальными условиями, можно найти распределение температур в де-

тали. При этом уравнение теплопроводности сводится к системе уравнений, имеющей в матричной форме следующий вид:

$$\frac{C(T^{n+w})}{\Delta t}(-T^n + T^{n+1}) + K(T^{n+w})[(1-w)T^n + wT^{n+1}] = F^{n+w}, \quad (4.5)$$

где **C** и **K** – матрицы теплопроводности и конвекции соответственно; **F** – вектор тепловых сил; T – значение температуры в узле; Δt – шаг по времени; n – номер инкремента; w – число, принимающее значение от 0 до 1 (предпочтительнее $w = 0,5$).

Для определения температуры T^{n+1} система уравнений (4.5) решается итеративно методом последовательных приближений на каждом временном шаге.

Логическая схема расчета температур представлена на рис. 4.2.

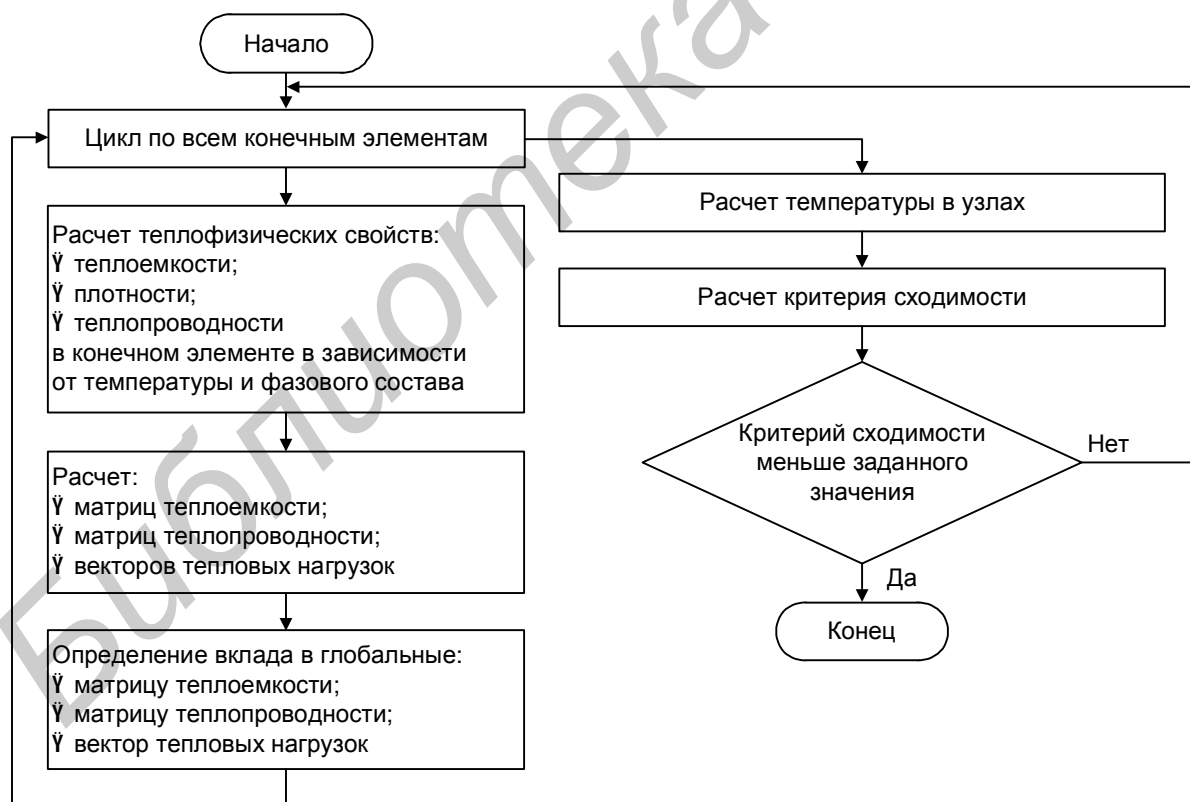


Рис. 4.2 Логическая схема расчета температур

На каждом временном шаге рассчитывается новый фазовый состав и учитывается изменение свойств материала в зависимости от фазового состава. Также производится вычисление теплоты, выделившейся или поглотившейся в результате фазового превращения.

Расчет фазового состава осуществляется путем аппроксимации ТКД. Для этого на каждом временном шаге (итерации) по кривым начала и конца фазового превращения определяется, будет ли происходить фазовое превращение. При наличии превращения вычисляется процент распавшейся и образовавшейся фазы в зависимости от температуры начала фазового превращения, изменения температуры за инкремент и длительности инкремента.

Логическая схема расчета фазового состава и твердости представлена на рис. 4.3.

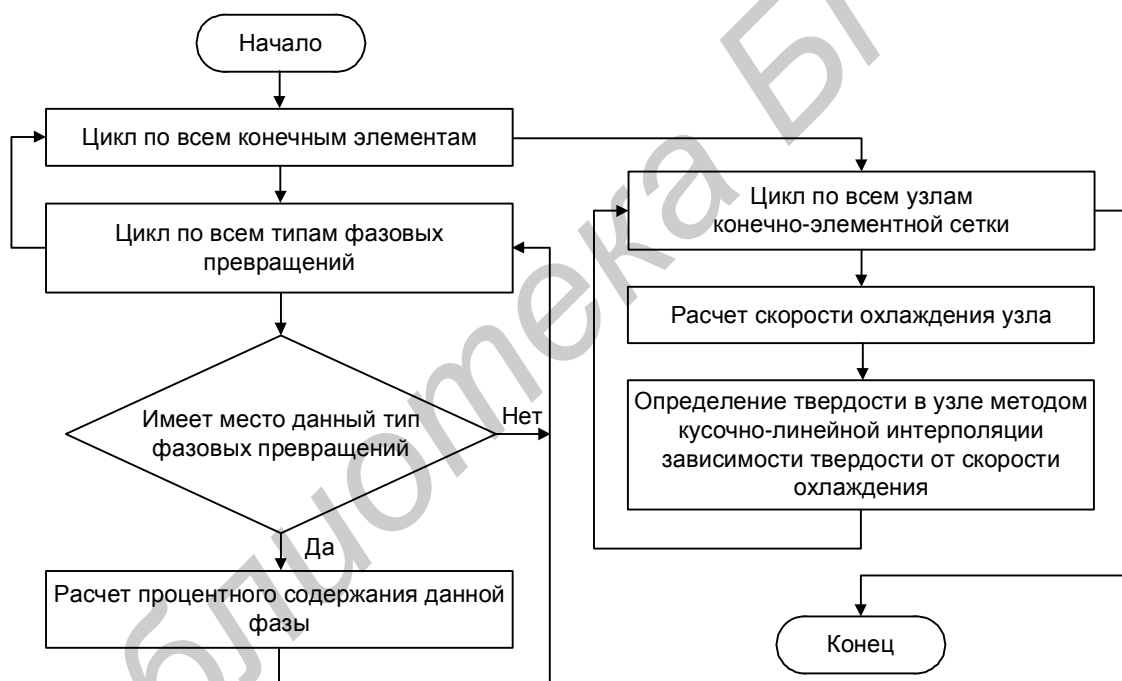


Рис. 4.3 Логическая схема расчета фазового состава и твердости

Расчет деформаций и напряжений осуществляется на основе решения упругопластической задачи. Данная задача усложняется тем, что распределение температур в теле изменяется с течением времени. Поэтому при расчете НДС определяется приращение деформаций и напряжений за прошедший инкремент времени, а затем рассчитываются накопленные деформации и напряжения.

Условие перехода конечного элемента (КЭ) из упругого состояния в пластическое определяется функцией текучести Мизеса f , которая равна разности интенсивности напряжения и напряжения текучести.

Связь между приращением деформации и приращением напряжения в упругой области ($f < 0$) или упругопластической области ($f = 0$) описывается зависимостью:

$$ds = Dde, \quad (4.6)$$

где $D = D_e$ – матрица упругости или $D = D_p$ – матрица пластичности.

Перемещения, вызванные температурными и структурными изменениями, определяются из условия равновесия:

$$K_{ep} \Delta U = dQ_{th}, \quad (4.7)$$

где K_{ep} – матрица жесткости; Q_{th} – вектор нагрузок.

Структурные и температурные изменения учитываются в векторе начальных деформаций:

$$\varepsilon_0 = (b\Delta T + d)[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (4.8)$$

где β – термический коэффициент линейного расширения; δ – изменение объема детали, вызванное фазовыми превращениями.

Логическая схема расчета перемещений, деформаций и напряжений представлена на рис. 4.4.

Зная величину приращения перемещений можно рассчитать все остальные параметры НДС.

На каждом временном шаге уточняются значения напряжений методом последовательных приближений.

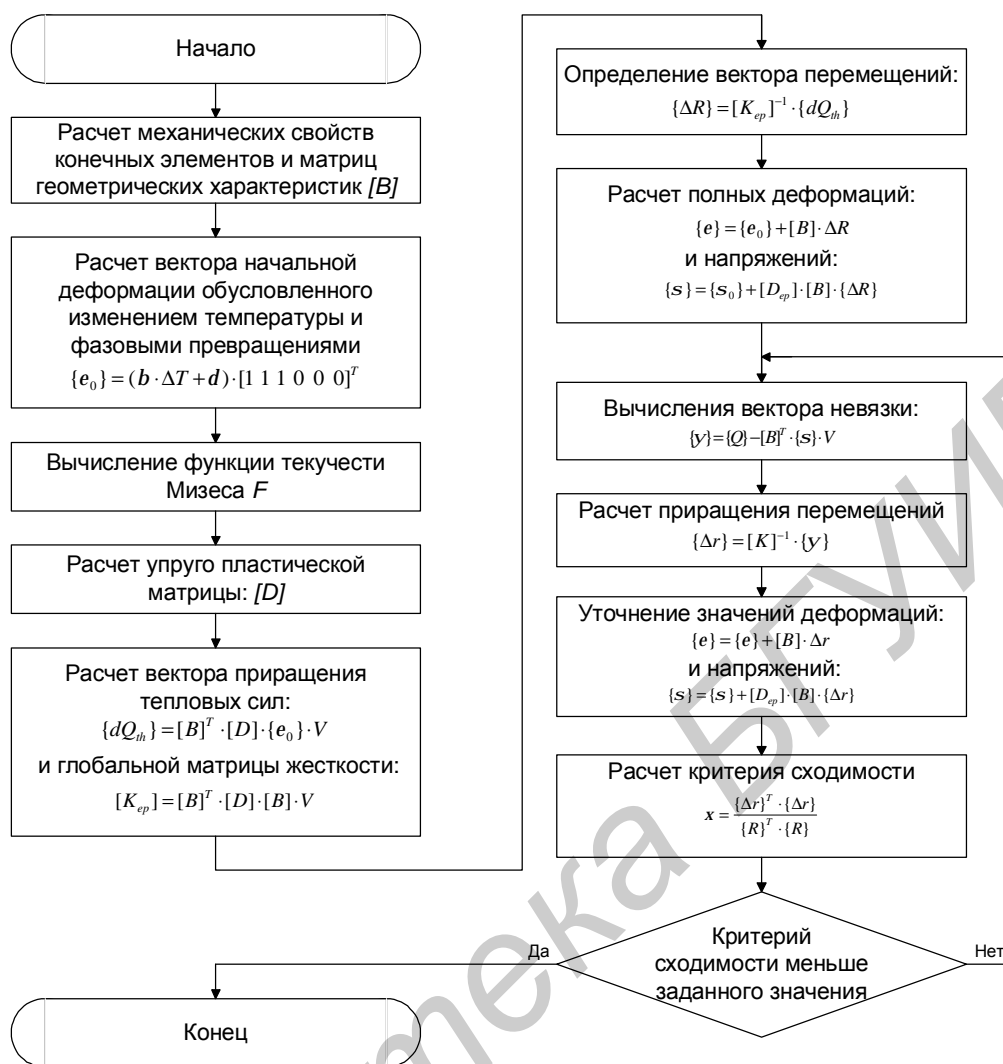


Рис. 4.4 Логическая схема расчета перемещений, деформаций и напряжений

4.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения.
2. Получить у преподавателя номер индивидуального задания.
3. Запустить на выполнение исполнительный файл обучающей программы (файл «Моделирование технологического процесса термообработки.exe»).
4. Сдать электронный коллоквиум.
5. Ознакомиться с индивидуальным заданием.
6. Провести моделирование процесса закалки в соответствии с индивидуальным заданием.
7. Оформить отчет.

4.3 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Примечание. Учитывая то, что для проведения моделирования требуется время, превышающее длительность лабораторного занятия, при выполнении работы используются результаты моделирования, соответствующие проектам, созданным в лабораторной работе № 3. Индивидуальные задания должны соответствовать созданным проектам.

Вариант 1: Исследование влияния скорости охлаждения на фазовый состав и твердость после закалки

Порядок выполнения:

1. В программе ThermoSim открыть проект val.tsp.
2. Провести анализ исходных данных (свойств материала, начальных и граничных условий и параметров расчета).
3. Перейти в режим просмотра результатов моделирования.
4. Произвести анализ влияния скорости охлаждения на фазовый состав и твердость после закалки. Для этого необходимо построить в нескольких узлах, взятых на разном расстоянии от торца, график изменения температуры от времени. По построенному графику определить среднюю скорость охлаждения в выбранном узле и посмотреть в нем полученный фазовый состав и твердость.

Вариант 2: Исследование влияния среды охлаждения (воздуха, воды и масла) на фазовый состав, твердость и остаточные напряжения после закалки

Порядок выполнения:

1. В программе ThermoSim последовательно открыть проекты plastina_voz.tsp (закалка на воздухе), plastina_mas.tsp (закалка в масле) и plastina_vod.tsp (закалка в воде).
2. В каждом случае провести анализ исходных данных (свойств материала, начальных и граничных условий и параметров расчета) и результатов моделирования (фазового состава, твердости и остаточных напряжений).
3. Провести анализ влияния различных сред охлаждения на фазовый состав, твердость и остаточные напряжения, получаемые после закалки на воздухе, в масле и воде.

Вариант 3: Исследование напряжений в процессе закалки

Исходные данные:

Порядок выполнения:

1. В программе ThermoSim открыть проект shesternya.tsp.
2. Провести анализ исходных данных (свойств материала, начальных и граничных условий и параметров расчета).
3. Перейти в режим просмотра результатов моделирования.
4. Провести анализ распределения напряжений (нормальных, касательных и эффективных) в различные моменты времени. Построить график изменения напряжений во времени. Определить максимальное напряжение, возникшее в детали, и место его возникновения.

Вариант 4: Исследование влияния распределения температуры на фазовый состав в процессе закалки

Порядок выполнения:

1. В программе ThermoSim открыть проект satellit.tsp.
2. Провести анализ исходных данных (свойств материала, начальных и граничных условий и параметров расчета).
3. Перейти в режим просмотра результатов моделирования.
4. Произвести анализ влияния распределения температуры на фазовый состав в детали. Для этого необходимо поставить в соответствие распределения температуры в детали в определенные моменты времени и полученный данному времени фазовый состав.

4.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Индивидуальное задание.
4. Результаты моделирования с распечатками исходных данных и результатов моделирования в графической форме.
5. Анализ результатов.
6. Выводы и рекомендации.

4.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение термообработки.
2. В чем заключается эффективность применения методов компьютерного моделирования при термообработке?
3. В чем заключаются преимущества МКЭ?
4. Что понимается под закалкой?
5. Назначение закалки.
6. Технологическая последовательность процесса закалки.
7. Что понимается под отпуском?
8. Назначение отпуска.
9. Технологическая последовательность процесса отпуска.
10. Что понимается под отжигом?
11. Назначение отжига.
12. Технологическая последовательность процесса отжига.
13. Алгоритм комплексной модели теплофизических процессов при термообработке.
14. Какие физические процессы сопровождают фазовые превращения?
15. Каким образом моделируется распределение температур в процессе закалки деталей?
16. Каковы граничные и начальные условия к уравнению теплопроводности?
17. Каково уравнение теплопроводности, сведенное к системе уравнений, имеющей вид в матричной форме, и каким образом оно решается?
18. Каким образом осуществляется расчет фазового состава?
19. Каким образом осуществляется расчет деформаций и напряжений?
20. Какова связь между приращением деформации и приращением напряжения в упругой области?
21. Каким образом определяются перемещения, вызванные температурными и структурными изменениями?
22. Каким образом учитываются структурные и температурные изменения?
23. Какова структура программного комплекса для моделирования технологических процессов термообработки?
24. Какие задачи решаются препроцессором?
25. Что входит в задачи процессора?

26. Что входит в задачи постпроцессора?

27. Что является основной информацией для хранения в БД?

Литература к лабораторной работе №4

1. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.
2. Кундас С. П., Кашко Т. А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. - Мн.: БГУИР, 2002. - 164 с.: ил.
3. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Кашко Т. А., Гринчик Н. Н. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. - Мн.: БГУИР, 2003. - 182 с.: ил.
4. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ И МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с автоматизированным проектированием сборочно-монтажных, контрольных и настроечно-регулирующих процессов в производстве РЭС, моделирование и оптимизация технологического процесса сборки электронного блока с применением ПЭВМ.

5.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Технологический процесс сборки и монтажа электронной аппаратуры (ЭА) представляет собой сложный комплекс действий исполнителей и оборудования по преобразованию исходных материалов и комплектующих элементов в готовое изделие с заданными характеристиками.

Математическая модель процесса монтажно-сборочных работ является результатом его формализации с необходимой степенью приближения к конкретным условиям производства. Формализации предшествует изучение структуры проектируемого процесса, результатом которого является "содержательное описание" процесса. По схеме сборки составляют перечень элементарных работ сборки и (или) контрольных и регулировочно-настроечных работ с максимальной возможной дифференциацией. Последовательность работ выдерживается в перечне приближенно в пределах сборочной единицы. Результаты разбиения заносят в таблицу. После заполнения таблицы приступают к разработке матрицы отношений будущего графа вариантов техпроцесса по алгоритму: каждый переход поочередно сравнивается со всеми другими и в матрицу заносят: $t_i \leq t_j \Rightarrow 1$; $t_i > t_j \Rightarrow 0$; $i = j \Rightarrow 1$, где t_i - момент начала i -го акта, t_j - момент начала j -го акта. То есть в i -й строке и j -м столбце ставится 1, если i -й переход должен быть начат раньше j -го или они независимы во времени, и 0, если данный переход должен следовать после сравниваемого.

Для лучшего понимания алгоритма рассмотрим пример: пусть путем попарного сравнения 15-ти элементарных сборочных переходов получена следующая матрица (пустые клетки здесь и далее соответствуют 1) (рис. 5.1, а). После введе-

ния матрицы в ЭВМ производится ее ранжирование (строки располагаются сверху вниз в возрастающем порядке общей суммы строки) (рис. 5.1, б). Ранжирование соответствует упорядочению переходов технологического процесса, то есть переходы располагаются во времени в требуемой последовательности.

По данному алгоритму с помощью специально разработанной учебной программы “optim.exe” строится матрица отношений переходов в разрабатываемом технологическом процессе. Такая матрица позволяет однозначно строить граф отношений (рис. 2.2), который показывает все возможные последовательности выполнения переходов и операций в технологическом процессе.

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2	0														
3	0														
4	0	0	0				0								
5	0		0		0		0								
6	0		0												
7	0		0												
8	0		0				0								
9	0		0				0	0							
10	0	0	0	0	0	0	0	0					0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	
12	0		0			0	0	0					0		
13	0	0	0			0	0	0					0		
14	0	0	0				0	0							
15	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	

а

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1														
2	0	1													
3	0	1	1												
4	0	1	0	1											
5	0	1	0	1	1										
6	0	1	0	1	0	1									
7	0	1	0	1	0	1	1								
8	0	0	0	1	0	1	0	1							
9	0	0	0	1	0	0	1	1	1						
10	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1					
11	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1				
12	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1			
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1		
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

б

Рис. 5.1 Матрица сравнения операций технологического процесса до (а) и после (б) ранжирования

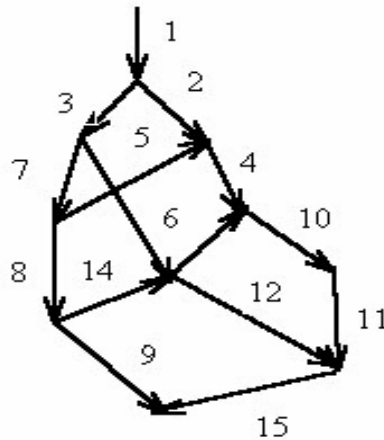


Рис. 5.2 Граф переходов технологического процесса

При составлении графа используются следующие свойства матрицы:

1. Число 0 в строке определяет ее порядковое место в ранжированной матрице и в графе.

2. Последний 0 в i -й строке определяет, после какого перехода (номер столбца, в котором 0 находится) идет i -й переход. Аналогично первый 0 j -го столбца указывает на переход (номер строки), следующий за j -м переходом.

3. Все строки с одним числом нулей - есть дуги, выходящие из одной или нескольких точек (последние нули указывают, от какой дуги они расходятся (по номеру столбца)).

4. Все столбцы с одинаковым числом нулей сходятся в одну или несколько точек (первый ноль в столбце (по номеру строки) указывает эту точку).

В результате анализа графа решаются следующие вопросы:

- выбирается число предметных потоков (в зависимости от числа автономных или слабо связанных друг с другом насыщенных ветвей графа);
- уточняется пространственно-временная структура сборочно-монтажных процессов;
- строятся исходные варианты техпроцессов (ТП).

Для построения исходного ТП все переходы записываются один за другим, строго выдерживая последовательность, заданную графом. Если выбрано многопредметное производство или многопредметная поточная линия, то ТП строится отдельно для каждого потока или каждого предмета. ТП должен охватывать все переходы без исключения, входящие в граф проектирования. Так, один из вариантов ТП по графу на рис. 5.1 запишется следующим образом: 1-2-3-7-5-8-14-6-13-4-9-10-12-11-15, другой 1-3-6-7-2-5-4-8-14-12-13-10-11-15-9 и т.д.

При этом возникает задача поиска глобального оптимума, но ввиду большого объема вычислений в данной работе не рассматривается.

Для дальнейшей оптимизации выбирается один или несколько вариантов ТП (по указанию преподавателя) и задача оптимизации сводится к поиску частного оптимума.

Суть метода построения оптимального ТП заключается в том что, меняя такт линии, производят перегруппирование переходов в операции таким образом, чтобы длительность каждой сформированной операции не превышала выбранного такта. Разность между тактом и длительностью операции является потерей времени и добавляется ко всему производственному циклу. Поэтому длительность цикла меняется при изменении величины такта. При изменении такта меняется и количество переходов, выполняемых над оборудованием, приборами, оснасткой, которые можно вынести в подготовительную операцию. Это существенно влияет на длительность цикла, так как число таких переходов велико.

Основная идея алгоритма оптимизации заключается в такой группировке переходов, при которой работы, требующие высокой квалификации, выпали бы в разряд подготовительных и выполнялись бы специалистами 1 разряда. Группируя в одну операцию переходы, схожие по виду используемого оборудования, можно снизить общую стоимость оборудования и аппаратуры на потоке. Таким образом, алгоритм оптимизации учитывает все переменные целевой функции.

Целевую функцию системы можно представить в следующем виде:

$$F = Sa_s \cdot b_s, \quad (5.1)$$

где a_s - коэффициент влияния; b_s - значение критериев.

Для ТП суммарное время выполнения всех переходов постоянно:

$$T_0 = \sum_{i \in I} t_i = const \quad (5.2)$$

где i - номер перехода по таблице переходов или графу, I - множество переходов, t_i - длительность перехода i во времени. Множество I - упорядочено, отношение порядка заключается в том, что соблюдается очередность выполнения переходов.

Суммарное время на программу выпуска изделий

$$T_{ПРОГ} = T_{ОСН} + T_{ВСП}, \quad (5.3)$$

где $T_{ОСН}$ - время на выполнение основных операций, $T_{ВСП}$ - время на выполнение подготовительных операций.

За длительность минимального ритма конвейера (линии) t_0 выбирается максимальное время выполнения i -го перехода для $i \in I$, тогда такт конвейера определяется

$$t_k = k \cdot t_0, \quad (5.4)$$

где k - дискретность, которая является вещественным числом и выбирается в зависимости от требуемой точности оптимизации из множества $k = [1, k_0]$.

$$k_0 = T_0 / t_0. \quad (5.5)$$

Оптимизация технологических процессов осуществляется при следующих допущениях: варьируя такт конвейера t (фактически число k), получаем различные варианты ТП, которые имеют разное количество операций; операции, полученные при различных вариантах разбиений, имеют различие в количестве составляющих их переходов; так как все варианты ТП реализованы на одном и том же множестве переходов одного цикла, то общая длительность цикла всегда равняется суммарной длительности операций для любого k -го разбиения множества переходов за вычетом простоев на операциях.

Алгоритм формирования операции при оптимизации ТП следующий: переход i попадает в формируемую операцию, если выполняется соотношение

$$t_k \geq t_i + \sum_{r=1}^{i-1} t_r. \quad (5.6)$$

Если соотношение (5.7) не выполняется, то формирование операции заканчивается и с t_i начинается формирование новой операции.

Индекс k обозначает k -е разбиение множества I на подмножество переходов, именуемых операциями.

Время простоев на j -й операции определяется соотношением

$$t_{npj} = t_k - t_{onj}, \quad (5.7)$$

где t_{onj} - длительность j -й операции.

Время простоев на всех операциях при очередном разбиении

$$T_{npk} = \sum_{j \in J} t_{npj} \quad (5.8)$$

Коэффициент простоя на цикле при k -м разбиении a_k определяется как

$$a_k = \frac{T_{np}}{T_{np} + T_0}, \quad (5.9)$$

где T_0 - суммарное время выполнения всех операций.

Длительность производственного цикла при k-м разбиении множества переходов:

$$T_k^{\text{ц}} = T_o + T_{\text{npk}} = T_o + T_o \cdot \frac{a_k}{1-a_k} = T_o \cdot \frac{1}{1-a_k}. \quad (5.10)$$

Количество операций (или рабочих мест) ТП для k-го разбиения множества переходов определяется по формулой

$$C_k = \frac{T_k^{\text{ц}}}{t_k} = \frac{T_o}{(1-a_k) \cdot k \cdot t_o} = \frac{k_o}{k} \cdot \frac{1}{1-a_k}. \quad (5.11)$$

Суммарное время T_k на программу выпуска изделий N равно

$$\begin{aligned} T_k &= (N + C_k - 1) \cdot t_k = \left(N + \frac{k_o}{k} \cdot \frac{1}{1-a_k} - 1 \right) \cdot k \cdot t_o = k \cdot t_o \cdot N - k \cdot t_o + \frac{k_o \cdot t_o}{1-a_k} = \\ &= k \cdot t_o \cdot (N - 1) + \frac{T_o}{1-a_k}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Из выражения (5.12) видно, что чем выше уровень параллельности выполнения операций (меньше число k), тем меньше времени требуется на программу выпуска изделий.

Прямая заработная плата рабочего на i -м переходе определяется выражением

$$Z_i = t_i \cdot S_i, \quad (5.13)$$

где S_i - часовая тарифная ставка, соответствующая разряду работ P_i .

Прямая заработная плата на операции j

$$Z_{jk} = S_{jk} \cdot t_k = S_{jk} \cdot k \cdot t_o, \quad (5.14)$$

где S_{jk} - часовая тарифная ставка максимального разряда работ на переходах, входящих в состав j -й операции.

Так как любое изделие, прежде чем стать готовой продукцией, пройдет ровно один производственный цикл из суммы всех операций, входящих в ТП при k -м разбиении, то заработная плата на изделие имеет вид

$$Z_k^1 = k \cdot t_o \cdot \sum_{jk \in Jk} S_{jk}, \quad (5.15)$$

а суммарная заработная плата на программу выпуска

$$Z_k = N \cdot k \cdot t_o \cdot \sum_{jk \in Jk} S_{jk}. \quad (5.16)$$

Так как оборудование для всех вариантов оптимизируемого ТП в нашем случае одинаковое, то целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$F_k = a_1 \cdot T_k^n + a_2 Z_k^n, \quad (5.17)$$

где a_1, a_2 - весовые коэффициенты, которые находят методом экспертных оценок для конкретных изделий; T_k^n, Z_k^n - нормированные значения суммарного времени и заработной платы на программу выпуска соответственно:

$$T_k^n = \frac{T_k}{T_{\max}}, \quad (5.18)$$

$$Z_k^n = \frac{Z_k}{Z_{\max}}, \quad (5.19)$$

где T_k, Z_k - суммарное время и заработная плата на программу выпуска при k -м разбиении оптимизируемого ТП; T_{\max}, Z_{\max} - максимальные суммарное время и заработная плата на программу выпуска из k вариантов ТП соответственно.

Оптимизировать ТП для нашего случая - это найти минимальное значение целевой функции F_k из множества исследуемых целевых функций, то есть

$$F_k \rightarrow \min. \quad (5.20)$$

Если рассматривать ТП с более высокой степенью детализации с операционной переориентацией изделия, то алгоритм формирования операций, определенный по (5.6), усложняется. Для ТП суммарное время выполнения всех переходов не постоянно: $T_0 \neq \text{const}$, k_0 определяется не по формуле (5.5), а равно

$$k_0 = \frac{T_{ok}^{\max}}{t_0}, \quad (5.21)$$

Где T_{ok}^{\max} - максимальное суммарное время выполнения всех переходов из множества k разбиений переходов по операциям.

Переход при данных условиях попадает в формируемую операцию, если

$$t_k \geq \sum_{r=1}^{i-1} t_r + d_i, \quad (5.22)$$

где

$$d_i = \begin{cases} t_i^1 + t_i^2 + t_i^3 + t_i^4 \\ t_i^2 + t_i^3 + t_i^4 \\ t_i^3 + t_i^4 \end{cases} . \quad (5.23)$$

В группе равенств (5.23) отображены 3 условия:

- 1) $\delta_i = t_i^1 + t_i^2 + t_i^3 + t_i^4$, если i -й переход типа 1;
- 2) $d_i = t_i^2 + t_i^3 + t_i^4$, если i -й переход типа 2;
- 3) $d_i = t_i^3 + t_i^4$, если i -й переход типа 3.

Место для перехода операции типа 4 всегда резервируется. Это вызвано тем, что при любом окончании операции необходимо отключить изделие, снять его с оборудования или оснастки. По данному алгоритму с помощью учебной программы "optim.exe" строится оптимальный ТП из множества ТП, полученных этой программой после первого этапа оптимизации. Алгоритм построения оптимального технологического процесса сборки и монтажа электронного блока для случая разбиения технологического процесса на операции определяется по формуле (5.6).

Если рассматривать технологический процесс сборки и монтажа электронного блока с более высокой степенью дискретизации ТП, при которой необходима детализация процесса с пооперационной переориентацией изделия, то оптимальный техпроцесс строится по формуле (5.22). При этом усложняется алгоритм разбиения элементарных работ по операциям и увеличивается количество расчетов, но при таком алгоритме возможно нахождение более оптимального варианта технологического процесса.

5.1.1 Пример выполнения лабораторной работы

Для платы таймера (сборочный чертеж - рис. 5.3) необходимо оптимизировать технологический процесс сборки и монтажа.

Учитывая технические требования сборочного чертежа и спецификацию (табл. 5.1) составляем таблицу разбиений на элементарные работы (операции или переходы) для разрабатываемого ТП (табл. 5.2). Составляем матрицу отношений будущего графа вариантов техпроцесса граф переходов (рис. 5.4) и варианта ТП по графу. По отраслевым нормам (ОСТ 4Г0.050.011-81 - для сбо-

ручно-монтажных работ, ОСТ 4Г0.050.018 - для настроечно-регулирующих работ), методическим пособиям нормируем переходы (графа 3 (табл. 5.2). По справочникам и методическим пособиям выбираем оборудование, оснастку, инструмент и приспособления (графа 4 табл. 5.2). В графе 5 указываем разряд работы. Вследствие предельной дифференциации работ разряды по переходам обычно не превосходят 2 или 3. Определяем тип перехода в соответствии с классификацией (графа 6):

- 1 - переходы, связанные с подключением изделия к аппаратуре или установкой его в рабочую позицию,
- 2 - переходы, связанные с подготовкой к самой работе по сборке, контролю или регулировке,
- 3 - непосредственная работа по сборке, контролю или регулировке,
- 4 - съем изделия с приспособления, оборудования и т.п.

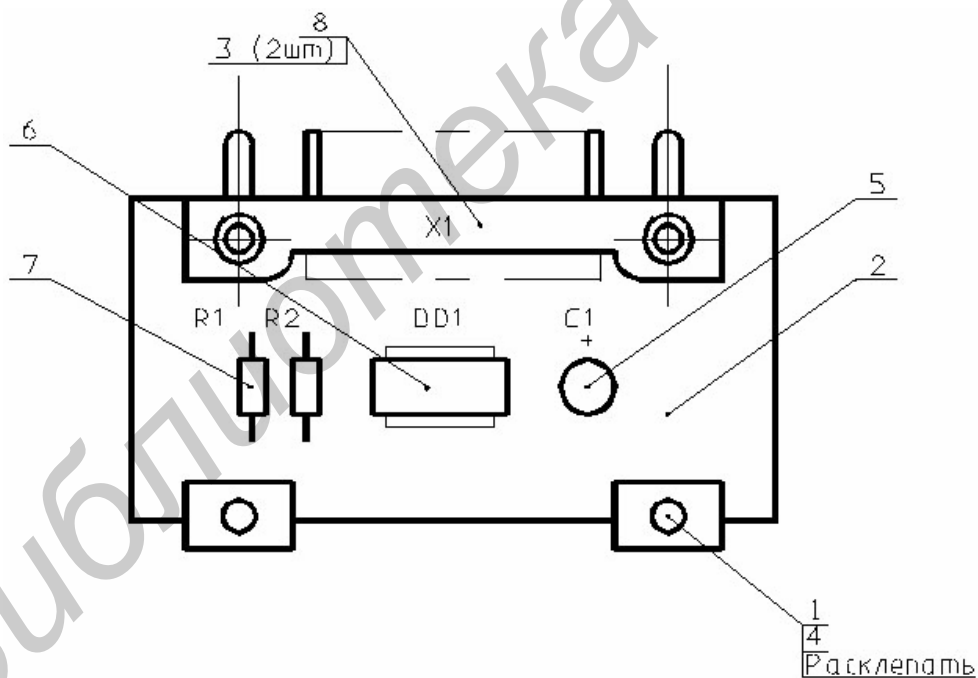


Рис. 5.3. Фрагмент сборочного чертежа платы таймера

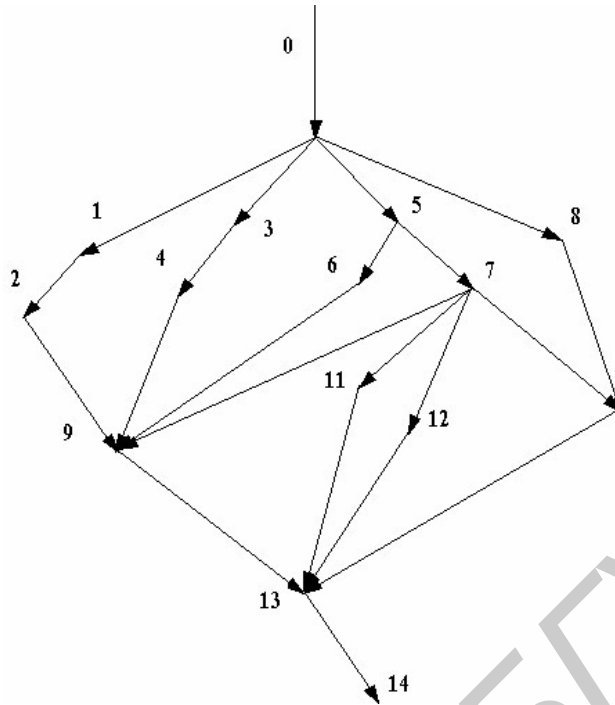


Рис. 5.4. Граф ТП сборки платы таймера

Таблица 5.1

Сборочный состав платы таймера

Позиция	Обозначение	Наименование	Количество	Примечание
		<u>Детали</u>		
1	КПКП.743564.00 1	Ручка	2	
2	КПКП.756745.00 1	Плата печатная	1	
		<u>Стандартные изделия</u>		
3		Винт М3х8.36.016 ГОСТ 17473-80	2	
4		Заклепка 2х6.35 ГОСТ 10300-68	2	
		<u>Прочие</u>		
5		Конденсатор К50-35-16 В-1 мкФ		

		ОЖ0.464.023 ТУ	1	С1
6		Микросхема КР 580 ВИ53		
		6К0.348.164 ТУ	1	DD1
7		Резистор С2-23-0.25-1 кОм ± 10%		
		ОЖ0.468.104 ТУ	2	R1, R2
8		Вилка ГРПМ1-61ШУ2		
		Ке0.364.006 ТУ	1	X1

Таблица 5.2

Пример заполнения таблицы элементарных работ (операций или переходов)

№ пере-хода	Наименование и содержание операции (перехода)	Длитель-ность пере-хода, мин	Оборудование, инструмент, оснастка	Раз-ряд ра-бот	Тип пере-хода
1	Установить ручку поз. 1 и за-клепку поз. 4 на плату печатную поз. 2 согласно чертежу	0.08		2	3
2	Установить плату печатную с ручкой и заклепкой на подставку и расклепать заклепку	0.14	Приспособле-ние БМ 769-1358	2	2
3	Повторить переход 1	0.08	-"-	2	3
4	Повторить переход 2	0.14	-"-	2	2
5	Установить вилку поз. 8 на плату поз.2 согласно чертежу	1.44		2	3
6	Завинтить винт поз. 3 в соответ-ствующее отверстие вилки поз. 8 согласно чертежу	0.14	Отвертка	2	3
7	Повторить переход 6 для другого винта	0.14	-"-	2	3
15	Установить конденсатор R1 на плату согласно чертежу	0.83	Пинцет ПГМ- 120	2	3
16	Повторить переход 15 для резистора R2	0.83	-"-	2	3
17	Установить конденсатор С1 на плату согласно чертежу	0.83	-"-	2	3

21	Паять плату волной припоя	0.20	Установка ЛПМ-500	3	3
23	Контролировать высоту Выступающих концов выводов согласно чертежу	0.06	Приспособле- ние визуаль- ного контроля ГГ63669/012	3	3

С помощью программы “optim.exe” ввести в память ПЭВМ таблицу разбиений на элементарные работы (переходы) и матрицу отношений вариантов для разрабатываемого техпроцесса. Построить граф вариантов техпроцесса и уточнить пространственно-временную структуру сборочно-монтажного процесса. Для построения исходного ТП все переходы записываются один за другим, строго выдерживая последовательность, заданную графом. ТП должен охватывать все переходы без исключения, входящие в граф проектирования. В соответствии с исходными данными: программой выпуска изделий N; степенью дискретизации ТП - 1 или 2 (по какому варианту алгоритма будет происходить оптимизация ТП); точностью оптимизации или дискретность задания числа k; коэффициентами влияния a_1 , a_2 для целевой функции, полученными методом экспертных оценок (a_1 - коэффициент, определяющий весовую значимость трудоемкости изготовления в оптимизируемом техпроцессе, а a_2 — заработной платы) выполнить оптимизацию и проанализировать полученные результаты. При необходимости повторить оптимизацию ТП с большей точностью и (или) степенью дискретизации.

5.2 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант 1

Выполнить оптимизацию и проанализировать полученные результаты. Программа выпуска изделий – 100; степень дискретизации ТП – 1; коэффициенты влияния: a_1 – 1, a_2 – 0,5; шаг изменения дискретности – 1. Сборочный чертеж и спецификация – модуль блока питания.

Вариант 2

Выполнить оптимизацию и проанализировать полученные результаты. Программа выпуска изделий – 5000; степень дискретизации ТП – 2; коэффициенты влияния: a_1 – 0,8, a_2 – 0,4; шаг изменения дискретности – 2. Сборочный чертеж и спецификация – модуль платы ввода-вывода.

Вариант 3

Выполнить оптимизацию и проанализировать полученные результаты. Программа выпуска изделий – 1000; степень дискретизации ТП – 1; коэффициенты влияния: $a_1 - 0,4$, $a_2 - 0,5$; шаг изменения дискретности – 3. Сборочный чертеж и спецификация – модуль задающего генератора.

Вариант 4

Выполнить оптимизацию и проанализировать полученные результаты. Программа выпуска изделий – 800; степень дискретизации ТП – 2; коэффициенты влияния: $a_1 - 0,7$, $a_2 - 1$; шаг изменения дискретности – 4. Сборочный чертеж и спецификация – модуль усилителя мощности.

5.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по работе.
2. Получить у преподавателя номер индивидуального задания.
3. Ответить на вопросы коллоквиума.
4. Ознакомиться с индивидуальным заданием.
5. Учитывая технические требования сборочного чертежа и спецификацию составить таблицу разбиений на элементарные работы (операции или переходы) для разрабатываемого ТП.
6. Разработать матрицу отношений будущего графа вариантов техпроцесса.
7. Запустить учебную программу "optim.exe".
8. Ввести в ПЭВМ таблицу разбиений на элементарные работы.
9. Ввести в ПЭВМ исходные данные для оптимизации ТП
10. Проанализировать полученные результаты и при необходимости повторить оптимизацию ТП с большей точностью и(или) степенью дискретизации.

5.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Индивидуальное задание.
4. Результаты моделирования с распечатками исходных данных и результатов моделирования в графической форме.

5. Анализ результатов.
6. Выводы и рекомендации.

5.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что вы понимаете под математической моделью технологического процесса?
2. Из каких этапов состоит моделирование и оптимизация технологического процесса?
3. Что такое целевая функция?
4. При каких допущениях осуществляется оптимизация технологических процессов в данной работе?
5. Алгоритм формирования операции при оптимизации ТП?
6. Алгоритм формирования оптимального ТП?

Литература к лабораторной работе № 5

1. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры. /И.П. Бушминский, О.Ш. Даутов, А.П. Достанко и др.; Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. - М.: Радио и связь, 1989. - 624 с.
2. Петренко А.И. Основы автоматизации проектирования. К.: Техника, 1982.
3. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В. Егунов, Б.Л. Жоржолиани, В.Г. Журавский, В.В. Жуков; Под ред. В.Г. Журавского. - М.: Радио и связь, 1988. - 280 с.
4. Применение ЭВМ в технической подготовке серийного производства /Под ред. С.П. Митрофанова. - М.: Машиностроение, 1981. - 356 с.
5. Ланин В.Л., Емельянов В.А., Хмыль А.А. Проектирование и оптимизация процессов производства электронной аппаратуры: Учеб. пособие.- Мн.:БГУИР - 196 с.
6. Анищенко Л.М., Лавренюк С.Ю., Петрухин В.В. Автоматизированное проектирование и моделирование технологических процессов микроэлектроники. - М.: Радио и связь, 1995. -176 с.
7. Попов М.Е. Основы математического моделирования технологических процессов. - Ростов-на-Дону: РИСХМ. - 93 с.
8. ОСТ 4ГО.050.011-81 Сборочно-монтажные работы.
9. ОСТ 4ГО.050.018-81 Настроечно-регулирующие работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ T-FLEX CAD

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение системы параметрического автоматизированного проектирования и черчения T-FLEX CAD, механизма параметризации и полного набора профессиональных инструментов компьютерного проектирования, позволяющего существенно упростить процесс конструирования и оформления графической документации. Проектирование технологической оснастки с применением T-FLEX CAD.

6.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

6.1.1 Общие сведения о программном комплексе T-FLEX CAD

Параметрическое проектирование, возможность назначения геометрических параметров через переменные и изменение этих параметров - это будущее всех систем автоматизированного проектирования и черчения. Эффективность системы T-FLEX CAD базируется в первую очередь на новой геометрической модели. Эта модель позволяет наполнить понятие "параметризация" более глубоким, чем это принято в других системах, содержанием. Идея параметризации уже прочно завоевала свое место в компьютерном проектировании. Под параметризацией подразумевается, прежде всего, многократное использование чертежа с возможностью изменения его параметров. T-FLEX CAD использует привычные для конструктора элементы и параметры проектирования. При этом совершенно не обязательно ставить элементы чертежа на точные позиции. Возможности по модификации размеров элементов и их положения на чертеже не имеют аналогов в других CAD-системах. Уникальными по своим возможностям являются средства создания сборочных параметрических чертежей. T-FLEX CAD позволяет получать сложные чертежи, в которых его отдельные части могут быть взаимосвязаны. Связь можно задавать как через геометрическую зависимость,

так и через значения параметров. При этом обеспечивается удаление невидимых линий в случае, если отдельные части чертежа перекрывают друг друга. Меняя параметры сборочного чертежа, можно за считанные секунды получить готовые чертежи нового проектируемого изделия. Одновременно с измененным сборочным чертежом вы получите и чертежи его составных частей (деталей), а также другие сопутствующие документы.

Одним из обычных атрибутов параметрических САД-систем является язык программирования, который используется для задания параметрических связей. В этой связи проявляется еще одно существенное достоинство программы T-FLEX CAD. От разработчика не требуется никаких специальных знаний в области программирования. Параметрам чертежа могут назначаться переменные. С помощью простых математических формул можно связывать переменные между собой. При этом не нужно изучать какой-либо язык программирования. Назначение переменных может происходить и при создании элемента, и при его последующем редактировании. Значение переменных можно получать из других чертежей или автоматически выбирать из баз данных. Всё это делает возможности по модификации чертежа безграничными.

T-FLEX CAD предлагает полный набор средств для оформления технических чертежей: нанесение линий различных типов, штриховок, размеров, текстов, шероховатостей, специальных символов и т.д. Важно отметить, что все элементы оформления могут быть связаны с параметрами чертежа. Это означает, что изменение параметров чертежа автоматически приводит к изменению соответствующих элементов оформления. Чертежи могут создаваться в соответствии с требованиями ЕСКД или международных стандартов. T-FLEX CAD позволяет мгновенно перевести готовый чертеж из одного стандарта в другой.

Трёхмерная версия T-FLEX CAD 3D позволяет получать параметрические трёхмерные модели. Созданные в системе трёхмерные твёрдотельные модели легко модифицируются, так как T-FLEX CAD 3D базируется на двумерной версии пакета. При параметрическом изменении двумерного чертежа автоматически изменяется его трёхмерное представление.

6.1.2 Особенности двумерного проектирования конструкций в T-FLEX CAD

В системе T-FLEX CAD изображение чертежа наносится на основе предварительно созданных элементов построения (см. руководство пользователя). Элементы построения, формирующие каркас чертежа, представляют собой бесконечные прямые и окружности, связанные между собой различными геометрическими отношениями. Этими отношениями могут быть параллельность, касание, симметрия, угол наклона и т.д. По аналогии с черчением на бумаге элементы построения можно сравнить с тонкими карандашными линиями, которые потом обводятся тушью.

Таким образом, прежде чем нарисовать линии чертежа, необходимо с помощью линий построения создать каркас чертежа. Линии изображения чертежа оказываются "привязанными" к линиям построения, и при изменении их положения будут следовать за ним. При этом сохраняются все геометрические отношения, которые были заданы для элементов построения.

В системе T-FLEX CAD чертеж может быть построен одним из следующих способов: параметрически и непараметрически.

Параметрический способ построения чертежей - это основной режим работы системы T-FLEX CAD. Используя преимущества параметрического проектирования T-FLEX CAD, возможно создать чертеж, который будет легко изменяться при дальнейшем проектировании. Этот чертеж можно включить в качестве элемента параметрической библиотеки для использования его в других, более сложных, чертежах.

Построение чертежа в T-FLEX CAD начинается с задания элементов построения. Элементы построения могут быть созданы различными способами. Сначала задаются базовые линии построения, от которых в дальнейшем вы будете строить новые линии построения. Базовыми линиями могут быть вертикальные и горизонтальные прямые. Далее строятся прямые или окружности, зависящие от базовых. Например, параллельные прямые, окружности касательные прямым. Тем самым определяется способ построения новых линий, который запоминается в системе. На пересечении построенных прямых вы создаете узлы, которые вам требуются для проведения дальнейших построений. Затем необходимо продолжить строить прямые и окружности, задавая их различными способами относительно построенных ранее. Например: прямая, проходящая через два узла, окружность касательная к прямой

и проходящая через узел и т.д. Все эти способы сохраняются, и в дальнейшем при изменении базовых или других элементов построения положение зависимых прямых, окружностей и узлов будет определяться исходя из способа их задания.

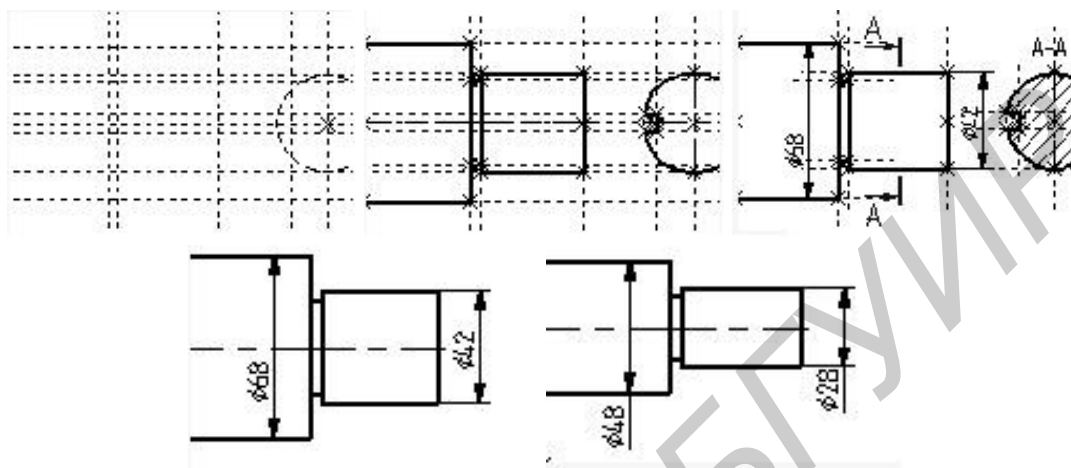


Рис. 6.1 Иллюстрация последовательности построения чертежа

Таким образом, на начальном этапе построения чертежа необходимо определить параметрические зависимости элементов построения чертежа, то есть построить параметрический каркас чертежа.

После задания вспомогательных линий осуществляется нанесение элементов, формирующих изображение чертежа. Наносятся линии изображения - отрезки, дуги, окружности. При их нанесении необходимо привязать их к созданным элементам построения - узлам и линиям построения.

После нанесения основного изображения начинается оформление чертежа. Наносятся размеры, привязываемые к линиям построения и узлам. Определяются контуры штриховок и способы их заполнения, наносится текстовая информация. При нанесении текстов можно задать привязку текстов к элементам построения - узлам, линиям построения. Это необходимо сделать, если текст должен перемещаться вместе с изменением изображения чертежа. Далее, если это необходимо, наносятся допуски, шероховатости, надписи. После этого получается параметрический чертеж с возможностью его модификации. Существует возможность изменять параметры элементов построения.

При этом все элементы нанесения будут изменять свое положение вслед за изменением положения элементов построения, с которыми они связаны. Таким

образом, можно получить различные варианты одного и того же чертежа. При этом все оформление чертежа будет соответственно изменяться.

Линии построения могут иметь числовой параметр (расстояние от параллельной прямой, угол, радиус окружности и т.д.). Значение параметра задается во время создания элемента построения. Некоторые из конструктивных элементов могут не иметь параметра, например, прямая, проходящая через два узла. В качестве параметра элемента построения может использоваться переменная. Значение переменной может быть задано константой или выражением. В выражении могут присутствовать другие переменные, различные арифметические и логические операции, условные операции, обращения к стандартным математическим функциям, а также обращения к внешним базам данных.

Любой чертеж системы T-FLEX CAD может быть использован при работе с другим чертежом в качестве фрагмента, с соответствующими параметрами. Фрагменты используются для создания параметрических сборочных чертежей.

Непараметрический чертеж строится аналогично большинству известных систем, когда сразу наносятся линии изображения.

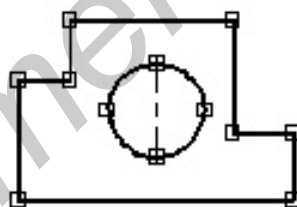


Рис. 6.2 Пример непараметрического чертежа

В системе T-FLEX изображение чертежа наносится на предварительно созданные элементы построения. Элементы построения, формирующие каркас чертежа, представляют собой бесконечные прямые, окружности, сплайны, эллипсы, эквидистанты, связанные между собой различными геометрическими отношениями. Этими отношениями могут быть параллельность, касание, симметрия, угол наклона и т.д. По аналогии с черчением на бумаге элементы построения можно сравнить с тонкими линиями, которые затем обводятся тушью. Прежде чем нарисовать линии чертежа, необходимо с помощью линий построения задать каркас чертежа. Линии изображения чертежа затем наносятся на этот каркас. Линии изображения чертежа оказываются "привязанными" к линиям построения, и при изменении их положения будут

следовать за ними. При этом сохраняются все геометрические отношения, которые были заданы для элементов построения.

Элементами построения в T-FLEX являются линии построения - прямые, окружности, эллипсы, сплайны, а также узлы. Узлы - это точки пересечения линий построения. Элементы построения не выводятся на принтер или плоттер. Кроме того, в любой момент их можно сделать невидимыми.

Важно отметить, что прежде чем создавать элементы построения вашего чертежа, необходимо проанализировать, какие именно отношения между линиями вы хотите задать.

Параметрам чертежа, а фактически параметрам линий построения (расстояниям, диаметрам и т.д.), можно назначать переменные. Это можно осуществлять и во время создания линии построения, и во время ее последующего редактирования. Затем, задавая значения переменных, можно получать новые варианты чертежа. С помощью простых математических формул в редакторе переменных переменные можно связывать между собой.

При изменении положения какого-либо элемента построения или значения какой-либо переменной система производит пересчет чертежа и его последующую перерисовку. Пересчет производится в соответствии с теми геометрическими отношениями, которые были заложены при его создании, а также, исходя из математических связей между переменными, если они были заданы. Как правило, грамотно созданный параметрический чертеж содержит несколько ключевых (внешних) переменных, в зависимости от которых производится перерасчет остальных переменных и всего чертежа.

Чертежи системы T-FLEX можно объединять друг с другом. Например, можно к чертежу детали добавить чертеж бланка форматки. Или можно включить чертеж болта в какой-нибудь сборочный чертеж. Более того, T-FLEX позволяет менять параметры включаемого чертежа. Так, если при включении болта задать ему необходимый диаметр, то на сборочном чертеже вы получите соответствующее изображение болта, рассчитанное на основе этого диаметра.

Чертежи T-FLEX, которые вы включаете в свой чертеж, называются фрагментами. Как и для других элементов, формирующих чертеж, для фрагментов существует команда создания (то есть включения в текущий чертеж) - FRagment и команда редактирования - EFRagment.

Чертежи, полученные с использованием чертежей-фрагментов, мы будем называть сборочными чертежами. Сборочные чертежи непосредственно не содержат в себе данных фрагментов. Они хранят лишь ссылки на эти чертежи.

Это позволяет добиться максимально компактного хранения чертежей в памяти и на диске. Кроме того, если один и тот же чертеж был включен в различные чертежи, то при его модификации произойдут соответствующие изменения и в тех чертежах, в которых он был использован.

Одним из преимуществ системы T-FLEX перед другими CAD-системами является возможность создания параметрических сборочных чертежей, в которых отдельные части-детали связаны между собой. При модификации чертежа сохраняются все основные зависимости между параметрами отдельных деталей. Более того, одновременно с модифицированным сборочным чертежом вы получите полный набор чертежей-деталей, которые участвовали в сборочном чертеже. При этом они будут иметь те параметры, которые получились в результате пересчета сборочного чертежа.

Чертежи-фрагменты, которые участвуют в сборочном чертеже, могут быть переменными, то есть в зависимости от каких-либо условий в сборочном чертеже будет участвовать тот или иной чертеж-фрагмент.

Каждый фрагмент может в свою очередь также состоять из фрагментов, причем уровень вложенности фрагментов практически не ограничен.

На основе фрагментов, входящих в состав сборочного чертежа, можно создать детализовочный чертеж.

6.1.3 Трехмерное твердотельное проектирование

Система T-FLEX CAD 3D обладает широким набором средств твердотельного моделирования, что позволяет пользователю создавать параметрические 3D модели любой сложности. При работе с 3D элементами используется все набор средств параметризации как и при создании двумерного чертежа (задание геометрических размеров и параметров элементов с помощью переменных и т.д.).

Для отображения 3D элементов служит окно 3D вида . Все 3D элементы и трехмерные тела, отображаемые в 3D виде окна текущего чертежа, составляют 3D сцену.

Для работы с 3D моделью предназначены группы команд "Построения" ('Рабочая плоскость' и т.д.) - для создания вспомогательных 3D элементов, "Операции" - для создания твёрдых тел. Операции используют рабочие плоскости (рабочие поверхности) и вспомогательные 3D элементы и\или уже существующие твёрдые тела (см. Руководство пользователя).

Рабочая плоскость является базовым элементом 3D модели. Относительно рабочих плоскостей задаётся положение в пространстве вспомогательных 3D элементов и трехмерных моделей. Схожий с рабочими плоскостями функциональный смысл имеют специальные системы координат, которые в качестве геометрической основы используют не плоскость, а цилиндр, сферу или тор.

Рабочие плоскости - плоскости, ориентированные определенным образом в трехмерном пространстве. Без создания рабочих плоскостей в T-FLEX CAD 3D невозможно построить трехмерную модель. Рабочие плоскости могут быть заданы в 2D окне или в 3D окне. Существуют следующие типы рабочих плоскостей:

- стандартные;
- вспомогательные;
- заданные на основе проекции элементов 3D модели;
- заданные посредством 3D систем координат;
- заданные на основе грани трёхмерного тела;
- заданные на основе другой рабочей плоскости.

Вспомогательные элементы (3D узлы, 3D профили, 3D пути и т.д.) служат для задания формы будущего тела, ориентации в пространстве, определения направлений, векторов, осей, траекторий и т.д.

Твердое тело образуется при выполнении одной из команд "Операции|...". На начальном этапе проектирования это может быть перемещение замкнутого контура по заданной траектории. Перемещение задаётся вектором выталкивания, осью вращения, пространственной траекторией (тело по траектории). Перемещаемый контур может быть плоским или иметь форму трёхмерной поверхности.

Исходными инструментами для создания твёрдых тел является набор базовых операций. Базовые операции использует вспомогательные элементы (3D профили, 3D узлы, 3D пути и т.д.). В дальнейшем изложении фраза 'выбор операции' подразумевает указание твёрдого тела, созданного с помощью этой операции. Твёрдое тело обладает такими атрибутами как масса, объём, площадь поверхности и т.д..

Работая с 3D моделью пользователь может использовать разные методы проектирования, либо их комбинацию. Создание 3D модели в окне 3D вида описано в разделе "Создание 3D модели в трёхмерном пространстве", проектирование на основе двумерного чертежа - в разделе "Создание 3D

модели по 2D элементам". Для работы первым методом необходимо ввести понятие режима активной рабочей плоскости.

Режим активной рабочей плоскости позволяет пользователю работать в 3D окне на рабочей плоскости с любыми 2D командами, создавая элементы построения и изображения так же как при работе с двумерным чертежом. Подробнее возможности данного режима описаны в разделе "Использование активной рабочей плоскости".

Элементами 3D модели будем называть рёбра, грани, вершины тела. Операции над твердыми телами используют элементы 3D модели для создания более сложных тел на основе уже существующих. Таким образом формируется иерархическая структура модели, отражающая исходные 3D элементы и тела и, созданные на их основе.

Создание сборочных конструкций предполагает использование 3D фрагментов или создание в документе нескольких твёрдых тел. В системе T-FLEX CAD любой документ, содержащий 3D модели может являться как сборкой, так и 3D фрагментом (смотри раздел "Создание сборочных трёхмерных моделей"). Гибкий механизм определения привязки элементов 3D сборки позволяет точно указать их положение в сборочной конструкции. Метод, в котором созданные отдельно элементы включаются в сборку, в дальнейшем будем называть "проектированием снизу-вверх". Другой путь заключается в создании 3D модели, содержащей набор операций, и последующим их (операций) сохранением в отдельных документах. Причем пользователь может управлять наличием и типом связи полученных деталей с исходным документов. Такой способ в дальнейшем будем называть "проектированием сверху-вниз".

В некоторых случаях бывает полезно посмотреть сборочную конструкцию в разобранном состоянии. Т.е. когда элементы сборки отделены друг от друга. Для этого у каждого элемента сборки предусмотрены параметры, задающие преобразования (смещение, повороты) относительно системы координат, к которой он привязан. При выполнении команды "Разборка - 3VX " сборочная конструкция будет отображена с учетом заданных параметров разборки.

В системе параметрического твердотельного проектирования T-FLEX CAD 3D существует два оригинальных способа создания трехмерной модели. Первый способ основан на использовании уже имеющегося 2D чертежа конструкции. Для того, чтобы начать создавать 3D модель, необходимо иметь

2D чертеж детали, содержащей необходимое количество видов. Виды должны находиться в проекционной связи между собою. Если вы хотите получить параметрическую трехмерную модель, то нужно задавать параметрические свойства в двумерном чертеже. Первым шагом по созданию модели является создание рабочих плоскостей. Зачастую бывает достаточно создать три взаимно перпендикулярные рабочие плоскости (фронтальную, горизонтальную и профильную), соответствующие виду спереди, сверху и слева. Затем создаются необходимые 3D элементы построений: 3D узлы и 3D профили. 3D узлы используются для привязки 3D профилей, задания векторов выталкивания и осей вращения. Для создания 3D профиля необходимо предварительно создать на 2D виде соответствующие контуры, используя команду "Создать штриховку". Если предполагается использовать штриховку только для 3D построений, то рекомендуется делать ее невидимой, чтобы не загромождать чертеж. Создается 3D профиль следующим образом: выбирается штриховка на 2D виде, указывается какой рабочей плоскости она принадлежит, и с помощью 3D узла задается высота ее расположения над рабочей плоскостью. После этого можно переходить к выполнению операций. Для выталкивания задается контур и два узла, определяющие высоту и направление выталкивания. Для вращения выбирается контур и два узла, определяющие ось вращения. Булева операция позволяет объединить созданные тела в единое целое. Описанный метод - это, можно сказать, классический способ создания параметрических трехмерных моделей в T-FLEX. Но есть и другие методы.

Второй способ основан только на использовании окна 3D вида. Построение модели начинается с создания рабочих плоскостей с последующим созданием на них необходимых 2D элементов. Затем выполняются все необходимые трехмерные операции, после чего можно создать проекции необходимых видов, которые можно дооформить в 2D окне, проставить размеры и т.д. (см. Руководство пользователя).

6.2 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Для приобретения навыков построения параметрических двумерных чертежей и трёхмерных моделей в системе T-FLEX CAD предлагаются четыре задания, при выполнении которых должны использоваться все возможности системы.

6.2.1 Индивидуальное задание №1

Сформировать двумерный чертеж детали, эскиз которой представлен на рисунке 6.1.

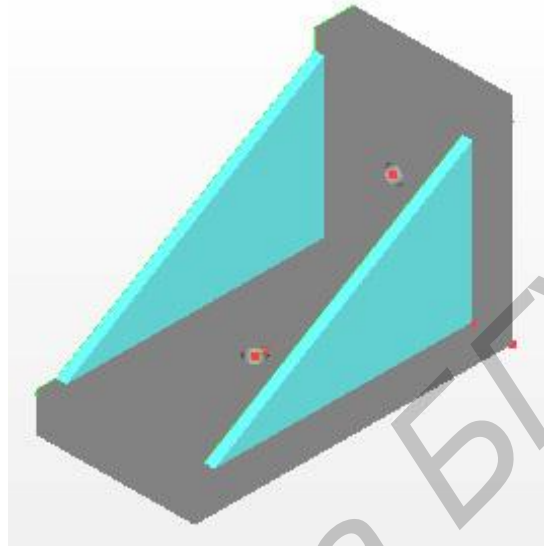


Рис. 6.1 Эскиз детали

Разработка чертежей конструкций деталей и сборочных единиц предполагает выполнение следующих операций:

1. Построение всех необходимых видов изображения.
2. Нанесение размеров с проставлением допусков и посадок.
3. Проставление шероховатостей поверхностей.
4. Выбор и нанесение материала.
5. Оформление технических требований.

6.2.2 Индивидуальное задание №2

Сформировать чертежи деталей, эскизы которых представлены на рисунке 6.2, а затем на их основе разработать чертеж сборочной единицы.

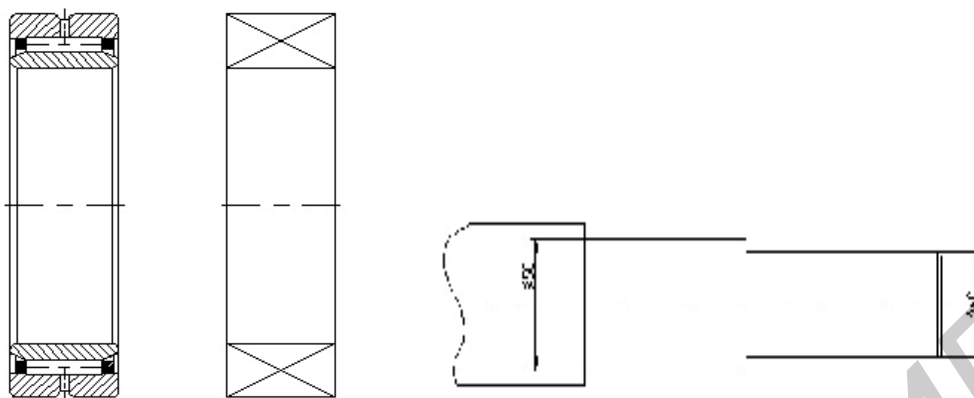


Рис. 6.2 Эскизы деталей

Разработка чертежей конструкций деталей и сборочных единиц предполагает выполнение следующих операций:

1. Построение всех необходимых видов изображения.
2. Нанесение размеров с проставлением допусков и посадок.
3. Проставление шероховатостей поверхностей.
4. Выбор и нанесение материала.
5. Оформление технических требований.

6.2.3 Индивидуальное задание №3

По заданному двумерному чертежу сформировать трехмерную твердотельную модель детали.

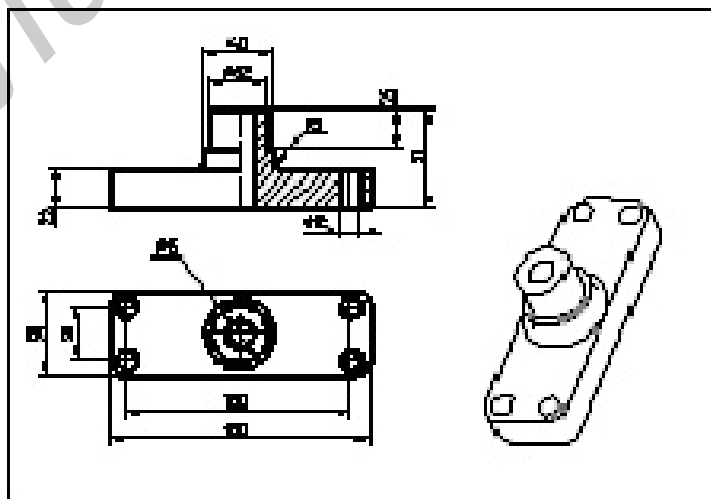


Рис. 6.3 Двумерный чертеж детали

6.2.4 Индивидуальное задание №4

Сформировать трехмерную твердотельную модель детали, представленной на рис. 6.4. Построения производить без использования 2D проекции. Затем с использованием 3D модели получить три стандартных вида двумерной проекции.

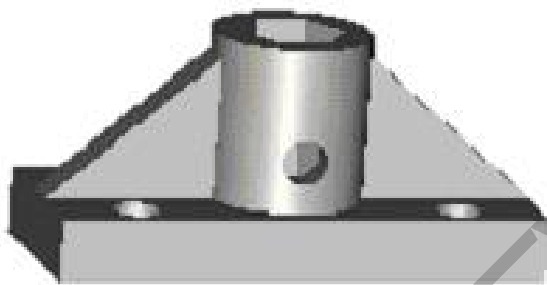


Рис. 6.4 Общий вид детали

6.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Предложенная ниже последовательность действий является общей для каждого из четырех индивидуальных заданий, но в тоже самое время возможно изменение порядка действий (некоторые пункты можно опустить или добавить). Начальным этапом выполнения каждого из вариантов задания является ознакомление с руководством пользователя системы T-FLEX CAD, которое входит в состав электронного учебно-методического комплекса к работе.

В соответствии с номером бригады и указаниями преподавателя для выполнения используется одно из четырёх индивидуальных заданий.

Выполнение работы осуществляется в следующей последовательности:

1. Изучить предложенный эскизный чертёж детали или сборочной единицы, определить вид входящих в сборочную единицу деталей.

2. Определить способ изготовления (используемые операции) каждой детали, входящей в изделие.

3. В соответствии с используемыми при изготовлении технологическими операциями оформить чертежи деталей. Для этого:

- 1) Загрузить на компьютере систему автоматизированного проектирования T-FLEX CAD.

2) Изучить и выбрать методы и средства построения элементов изображения.

3) Построить необходимые виды изображения.

4) Нанести размеры, допуски и посадки, шероховатости поверхностей.

5) Вставить сформированный фрагмент чертежа на стандартный формат.

4. Для каждой детали до этапа формирования фрагмента на основе двумерного чертежа построить трёхмерную модель. (используются примеры и способы построения из пункта "Пример построения трехмерной модели")

5. Оформить отчет по проделанной работе в соответствии с требованиями, указанными в п. 5. настоящей лабораторной работы.

6.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт по лабораторной работе должен содержать следующие пункты:

1. Титульный лист, оформленный с соблюдением требований ГОСТ.

2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения.

4. Индивидуальное задание.

5. Результаты разработки и их описание.

6. Анализ полученных результатов и выводы по проделанной работе.

Отчёт оформляется на стандартных листах формата А4 с использованием распечаток полученных чертежей деталей и сборочного чертежа.

6.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких отраслях производства, и для каких целей используется система T-FLEX CAD?

2. В чём заключается преимущества параметрического черчения по сравнению с обычным несвязанным построением чертежа?

3. На какой геометрической модели базируется эффективность система проектирования T-FLEX CAD?

4. В чём проявляются уникальные средства данной системы автоматизированного проектирования по оформлению конструкторских документов?

5. Какие действия позволяет автоматизировать трёхмерная версия T-FLEX CAD 3D?

6. Какие типы элементов использует система T-FLEX CAD при создании чертежа? Каким образом осуществляется их создание и редактирование?

7. В чём заключаются особенности построения параметрических чертежей в отличие от непараметрических и какие команды системы при этом используются?

8. Как различаются способы задания параметров элементов чертежа? В чём заключаются особенности каждого способа при реальной разработке конструкций?

9. Для каких целей используются дополнительные элементы построения?

10. На каких принципах строится построение двумерных сборочных чертежей в системе T-FLEX CAD? Общая характеристика фрагментов.

11. Описать алгоритм создания фрагментов. Какими способами осуществляется "привязка" фрагментов на чертеже?

12. Основные понятия, используемые в трёхмерной версии пакета T-FLEX CAD 3D.

13. В чём заключаются особенности построения трёхмерных моделей деталей по двумерному проекту?

14. Каковы особенности сборки трёхмерных деталей в сборочную единицу?

15. Различаются ли способы и методы создания и "привязки" трёхмерных фрагментов? В чём заключается основное различие локальных и целевых систем координат?

16. Какие возможности предоставляет проецирование трёхмерных моделей для построения двумерных проекций?

Литература к лабораторной работе № 6

1. T-FLEX PARAMETRIC CAD. Двумерное проектирование и черчение. Руководство пользователя. М.: АО "ТОП Системы", 1999.

2. T-FLEX PARAMETRIC CAD. Трёхмерное моделирование. Руководство пользователя. М.: АО "ТОП Системы", 1999.

3. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА. Справочник. Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов и др. Под ред. Э.Т. Романычевой. М.: Радио и связь, 1989.

4. Система автоматизированного технологического проектирования ТехноПро'99. Руководство пользователя. М.: АО "ТОП Системы", 1999.

Учебное издание

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Лабораторный практикум

по дисциплине «Компьютерное моделирование технологических систем»
для студентов специальностей I-39 02 02 «Проектирование и производство
радиоэлектронных средств» и I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное
проектирование радиоэлектронных средств»

Авторы-составители:

Кундас Семен Петрович

Марковник Денис Викторович

Тонконогов Борис Александрович и др.

Ответственный за выпуск Д. В. Марковник

Подписано в печать 11.08.06.

Гарнитура «Таймс».

Уч.-изд. л. 4,0.

Формат 60x84 1/16.

Печать ризографическая

Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,0.

Заказ 52.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6