УРОВНИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование большинства технических объектов можно выполнять на **микро-**, **макро-** и **метауровне**, различающихся степенью детализации рассмотрения процессов, протекающих в объекте.

- ММ технического объекта на **микроуровне** является система дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми уравнениями. Точное решение ее удается получить лишь для частных случаев.
- ММ технического объекта на **макроуровне** является система дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями.
- ММ на **метауровне** моделируют в основном 2 категории:

  - объекты теории автоматического управления;

  - объекты, являющиеся предметом теории массового обслуживания.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

Физико-химические процессы, протекающие при сварке:

- **Тепловые**
- **Металлургические**
- **Деформационные**
- **Диффузионные**
- **…**

Выделим три особенности процессов при сварке как объектов расчета:

- **Неоднородность среды**
- **Нелинейность явлений**
- **Системность процесса сварки**

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

- **Расчет режимов сварки** по геометрическим критериям размеров швов.
- **Оценка формирования шва** по критериям допустимых уравнений дефектов формы и сплошности шва.
- **Оценка свариваемости** высокопрочных сталей и других конструкционных материалов по критериям отсутствия трещин, обеспечения соответствующего структурного состояния и физико-механических свойств.
- **Оценка несущей способности** сварных конструкций и соединений.
- ...

РАСЧЕТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

- Анализ – определение свойств объекта по его описанию. Виды:
  – Одновариантный – при заданном наборе входных и внутренних параметров определяются выходные параметры.
  – Многовариантный – внешние и внутренние параметры варьируются в некоторой области.

- Синтез – создание объекта с заданными свойствами. Виды:
  – Структурный – определение структуры объектов, то есть составляющих элементов и способов их связи между собой.
  – Параметрический – определение числовых значений параметров при заданной структуре.

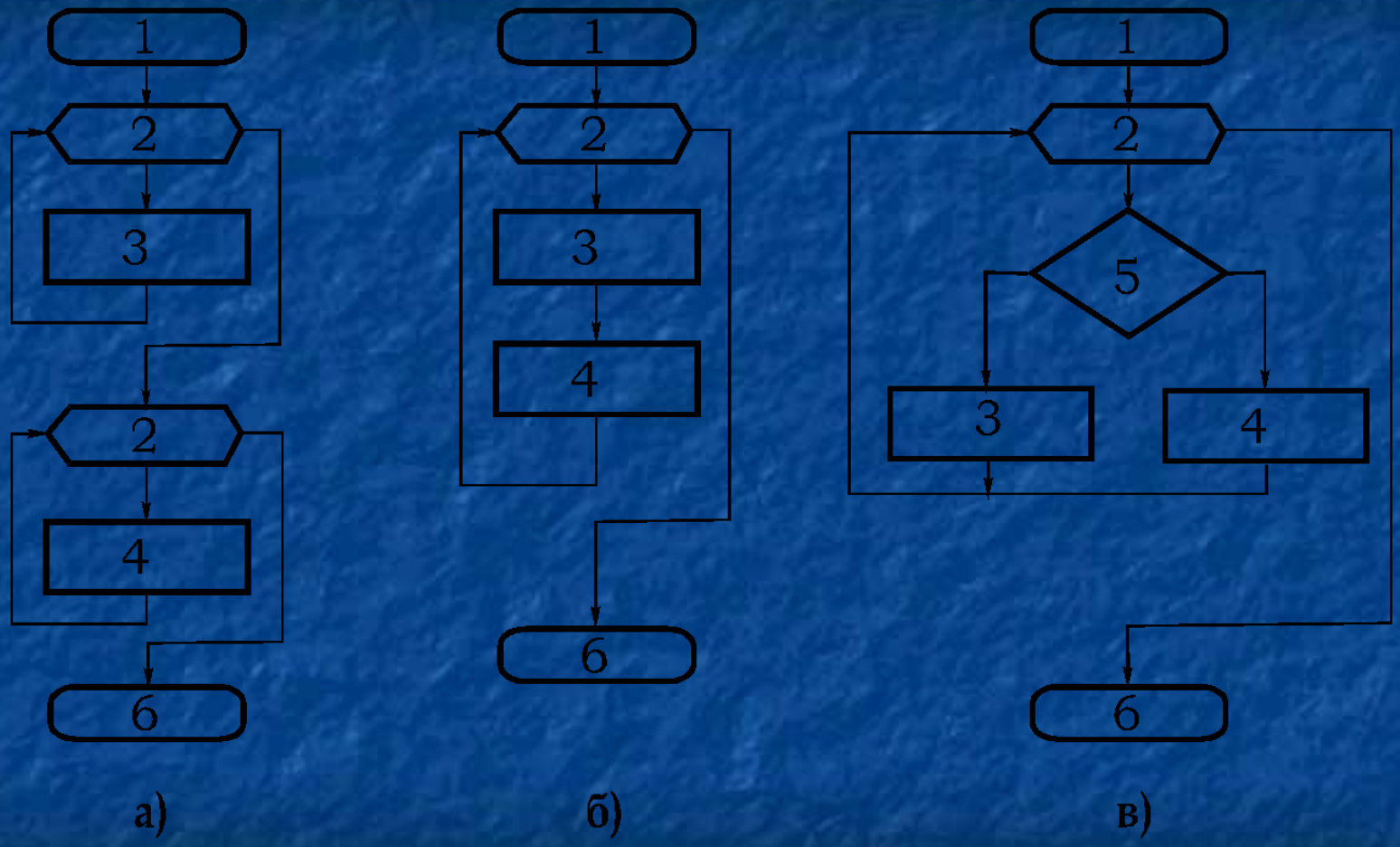
- Оптимизация – определение наилучших в смысле производительности, стоимости, качества и других значений параметров.

Задачи синтеза и оптимизации полностью включают в себя задачи анализа

ЭТАПЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. Составление РС (структурная модель)
2. Математическое описание РС
3. Качественный анализ ММ (феноменологическая модель)
4. Разработка алгоритма
5. Создание программного обеспечения
6. Тестирование и анализ результатов вычислений
7. Выработка практических рекомендаций

СТРУКТУРЫ ММ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ



а) совместная ММ; б) системная ММ; в) сопряженная ММ

(1-пуск. 2- итерационный цикл. 3, 4- простые ММ. 5- анализ положения границ. 6 –стоп).

СВОЙСТВА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

- Полнота ММ позволяет отразить в достаточной мере именно те характеристики и особенности ТО, которые интересуют нас с точки зрения поставленной цели
- Точность ММ дает возможность обеспечить приемлемое совпадение реальных и найденных при помощи ММ значений выходных параметров ТО.
- Адекватность ММ — это способность ММ отражать характеристики ТО с относительной погрешностью не более некоторого заданного значения δ
- Экономичность ММ оценивают затратами на вычислительные ресурсы (машинное время и память), необходимые для реализации ММ на ЭВМ.
- Робастность ММ (от английского слова robust — крепкий, устойчивый) характеризует ее устойчивость по отношению к погрешностям исходных данных.
- Наглядность ММ является ее желательным, но необязательным свойством.

СВОЙСТВА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

- И наконец, исходя их определения ММ, вытекает свойство универсальности ММ. Это можно объяснить тем, что в математике используют абстрактные основополагающие понятия, немногочисленные, но весьма емкие по содержанию.

Это позволяет конкретные факты из самых различных областей знаний рассматривать как проявление этих понятий и отношений между ними. Совокупность таких понятий и отношений, выраженных при помощи системы математических символов и обозначений и отражающих некоторые свойства изучаемого объекта, и называют математической моделью этого объекта.

В данном случае математика выступает, по существу, в роли универсального языка науки. Его универсальность французский математик Анри Пуанкаре (1854-1912) определил всего одной фразой: „Математика — это искусство называть разные вещи одним и тем же именем".

ТИПИЧНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

Основными параметрами термического цикла **ЗТВ** при однопроходной сварке или наплавке являются максимальная тем-ра **Тм** , мгновенная скорость охлаждения **ω** при данной тем-ре **Т** и длительности нагрева $t_н$ выше **Т**.

В зависимости от схемы распространения теплоты применяют различные формулы для расчета скорости охлаждения:

- для массивного тела (трехмерного теплоотвода):

$$\omega = \frac{2\pi\lambda(T - T_0)^2}{q / v} \qquad (1)$$

- для пластины (двухмерного теплоотвода):

$$\omega = \frac{2\pi\lambda c\gamma(T - T_0)^3 \delta^2}{(q / v)^2} \qquad (2)$$

критическую толщину листа **δк** можно определить, из (1) и (2):

$$\delta_x = \sqrt{\frac{q/v}{c\gamma(T-T_0)}} \qquad (3)$$

Учитывая то, что **ω** постоянно уменьшается по мере снижения **T**, понятие скорости охлаждения в интервале температур теряет смысл. Предпринята попытка ввести эквивалентную (постоянную) скорость охлаждения WЭ в интервале температур, достаточно хорошо отражающую динамику охлаждения металла шва:

$$\omega_э = \frac{(T_2-T_1)^2}{2S} \qquad (4)$$

где **S** – величина температурно-временной области, ограниченной участком кривой термического цикла сварки в интервале $T_1 - T_2$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

Для характеристики охлаждения зоны термического влияния в диапазоне температур вместо средней скорости охлаждения наиболее целесообразно использовать обратную ей величину – время охлаждения или длительность пребывания различных точек зоны термического влияния в интервале температур. Установлено, что для всех точек зоны шва, нагретых выше 900°С, время охлаждения в интервале 800-500 °С приблизительно равно.

Диапазон температур 800°- 500°С является одним из важнейших и определяет кинетику фазового превращения в стали. В настоящее время охлаждение в интервале 800°- 500°С , обозначаемое $t_{8/5}$, признано основным критерием, определяющим механические свойства сварных соединений низколегированных сталей. В ряде стран, например в ФРГ, время $t_{8/5}$ вводится в нормативные документы по сварке низколегированных сталей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

Формулы для расчета величины **t8/5** :

- для массивного тела (трехмерного теплоотвода):

$$t_{8/5} = \frac{q}{2\pi\lambda v}\left(\frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0}\right) \qquad (5)$$

- для пластины (двухмерного теплоотвода):

$$t_{8/5} = \frac{q}{4\pi\lambda c\gamma (v\delta)^2}\left(\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2}\right) \qquad (6)$$

- критическая толщина листа **δк**:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{q}{vc\gamma}\left(\frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0}\right)} \qquad (7)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

В уравнениях (5) – (7) напряжение дуги **U** изменяется в вольтах, сила тока **I** – в амперах, скорость сварки **v** – сантиметрах в секунду, температура подогрева T_0 - в градусах Цельсия.

Кроме того, необходимо ввести коэффициенты термического КПД нагрева **η** в зависимости от способа дуговой сварки и коэффициенты двухмерного (F_2) или трехмерного (F_3) теплоотвода, а также учесть зависимость теплофизических констант от температуры для практически используемого диапазона рабочих температур **20°-250°C**.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

В итоге :

- для массивного тела (трехмерного теплоотвода):

$$t_{8/5} = \left(0{,}87 - 5\cdot 10^{-4} T_0\right)\eta \frac{UI}{\nu} F_3 \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}\right) \qquad (8)$$

- для пластины (двухмерного теплоотвода):

$$t_{8/5} = \left(0.043 - 4.3\cdot 10^{-5} T_0\right)\left(\frac{\eta UI}{\nu\delta}\right)^2 F_2 \left(\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2}\right) \qquad (9)$$

- критическая толщина листа **δк**:

$$\delta_к = \sqrt{\frac{0.043 - 4.3\cdot 10^{-5} T_0}{0.67 - 5\cdot 10^{-4} T_0} \frac{\eta UI}{\nu}\left(\frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0}\right)} \qquad (10)$$

Выражения ($0.043 - 4.3\cdot 10^{-5} T_0$) и ($0.67 - 5\cdot 10^{-4} T_0$) учитывают теплофизические константы низколегированных сталей и их зависимость от температуры в интервале **20°- 250°С**.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

Табл. 1 - Значения термического КПД нагрева.

№	Способ сварки	η
1.	Сварка под флюсом	1,0
2.		0,8…0,9
3.	Ручная дуговая сварка	0,8…0,9
4.		0,7…0,8
5.	Сварка в CO2	0,6…0,7
	Аргонодуговая сварка:	
	- плавящимся электродом	
	- неплавящимся электродом	

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЗТВ

Табл. 2 – Значения коэффициентов F_2 и F_3.

№	Тип шва	Коэффициенты типа шва	
		F2	F3
1.	Наплавленный валик	1,0	1,0
2.	Соединение внахлестку	0,7	0,67
3.	Тавровое соединение	0,45…0,67	0,67
4.	Угловое соединение	0,67…0,9	0,67
5.	Стыковое соединение:	1,0	--
6.	-сквозное проплавление	0,9	0,9
7.	-средние слои	1,0	0,9…1,0
8.	-верхние слои	1,0	1,0…1,2
9.	-корень V-образного шва	0,45…0,67	0,67
10.	Крестовое соединение:	0,30…0,67	0,67
	-первый и второй швы		
	-третий и четвертый швы		

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Математическая модель плавления электродной проволоки должна устанавливать детерминированные взаимосвязи между характеристиками плавления металла электродной проволоки:

$a_р$ — коэффициент расплавления,

$v_э$ — линейная скорость плавления электродной проволоки;

и его физическими свойствами:

(γ, — плотность металла;

Тпл — температура плавления;

Ткип — температура кипения;

c — удельная теплоемкость;

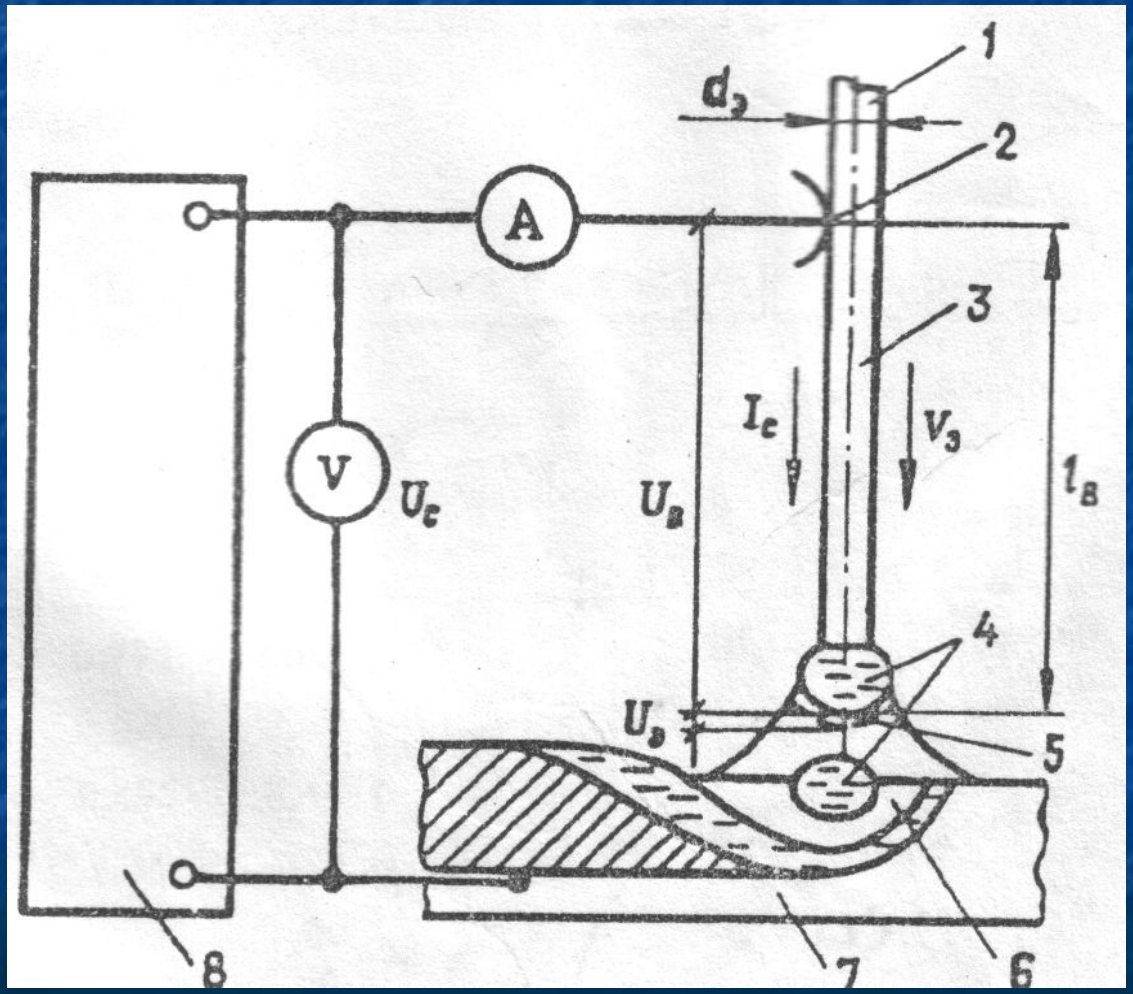
ΔНпл — скрытая теплота плавления;

ρ — удельное электросопротивление;

$\varphi_в$ — работа выхода электрона;

а также параметрами режима сварки: (*Iсв*, *Uд*, *dэ*, *lв*).

Физическая модель плавления электродной проволоки:



- 1 - электродная проволока;
- 2 - токоподвод;
- 3 - вылет электродной проволоки;
- 4 - капля электродного металла;
- 5 - приэлектродная область;
- 6 - дуга;
- 7 - основной металл;
- 8 - источник сварочного тока.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

- Математическая модель плавления электрода основана на уравнении баланса энергии на электроде:

$$W_{пл} = W_э + W_в, \qquad (1)$$

где $W_{пл}$ — расход энергии на нагрев и плавление электродной проволоки; $W_э$ и $W_в$, — приход энергии на торце электрода и на вылете электродной проволоки.

- Выразив расход энергии через массу расплавленной электродной проволоки $M_э$ ($M_э = F_э L_э \gamma_{тв}$) и теплосодержание капель электродного металла $H_{кап}$, получаем выражения для определения коэффициента расплавления $a_р$ и линейной скорости плавления электрода $v_э$:

$$\alpha_р = \frac{M_э}{I_{св}^{в} t_{св}} = (U + U)\frac{1}{H_{кап}} \qquad (2)$$

$$v_э = (U_э + U_в)\frac{I_{св}}{H_{кап} F_э \gamma_{тв}} \qquad (3)$$

- Падение напряжения электрода $U_э = U_a + \varphi_в$, (4)

  где U_a – падение напряжения на аноде. U_a мало зависит от материала анода и состава газовой фазы и может быть принято Ua=(2,43±0,29) В.

- Падение напряжения на вылете определяется при постоянном удельном сопротивлении $\rho_{ср}$ для диапазона температур на вылете от То до Тпл :

$$U_в = \frac{4\pi\rho_{ср} l_в I_{св}}{\pi d_э^2} \quad (5)$$

- Теплосодержание капель электродного металла определяем при условии, что $T_{кап} = 0{,}9T_{кип}$:

$$Н_{кап} = c_{ср}(Т_{пл}-T_0) + \Delta H_{пл} + c_ж(T_{кап} - T_{пл}), \quad (6)$$

где

$$c_{ср} = \frac{c_{тв} + c_ж}{2}$$

Табл. 1 Физические свойства электродных материалов

Основа	Плотность γ, г/см3	Температура °С		Удельная теплоемкость, Дж/(г·°С)		Скрытая теплота плавления $\Delta H_{пл}$, Дж/г	Удельное электросо-противление $\rho_{ср}$, Ом·см ·10-6	Работа выхода $\varphi_в$, эВ
		$T_{пл}$	$T_{кип}$	$c_{тв}$	$c_ж$			
Fe	7,87	1536	2860	0,456	0,795	272,2	75	4,31
Ni	8,90	1455	2915	0,452	0,620	301,7	45	4,50
Cu	8,96	1083,4	2560	0,386	0,495	204,9	10	4,40
Mg	1,74	649	1090	1,038	1,360	358,4	15	3,64
Al	2,70	660,1	2520	0,917	1,080	388,1	13	4,25
Ti	4,50	1667	3285	0,528	0,700	392,5	115	3,95
Mo	10,20	2615	4610	0,251	0,500	293,3	40	4,30

- *Плотность металла не зависит от температуры*
- *Размеры капель и характер переноса не учитываем.*