

Russia

Lipetsk State Technical University

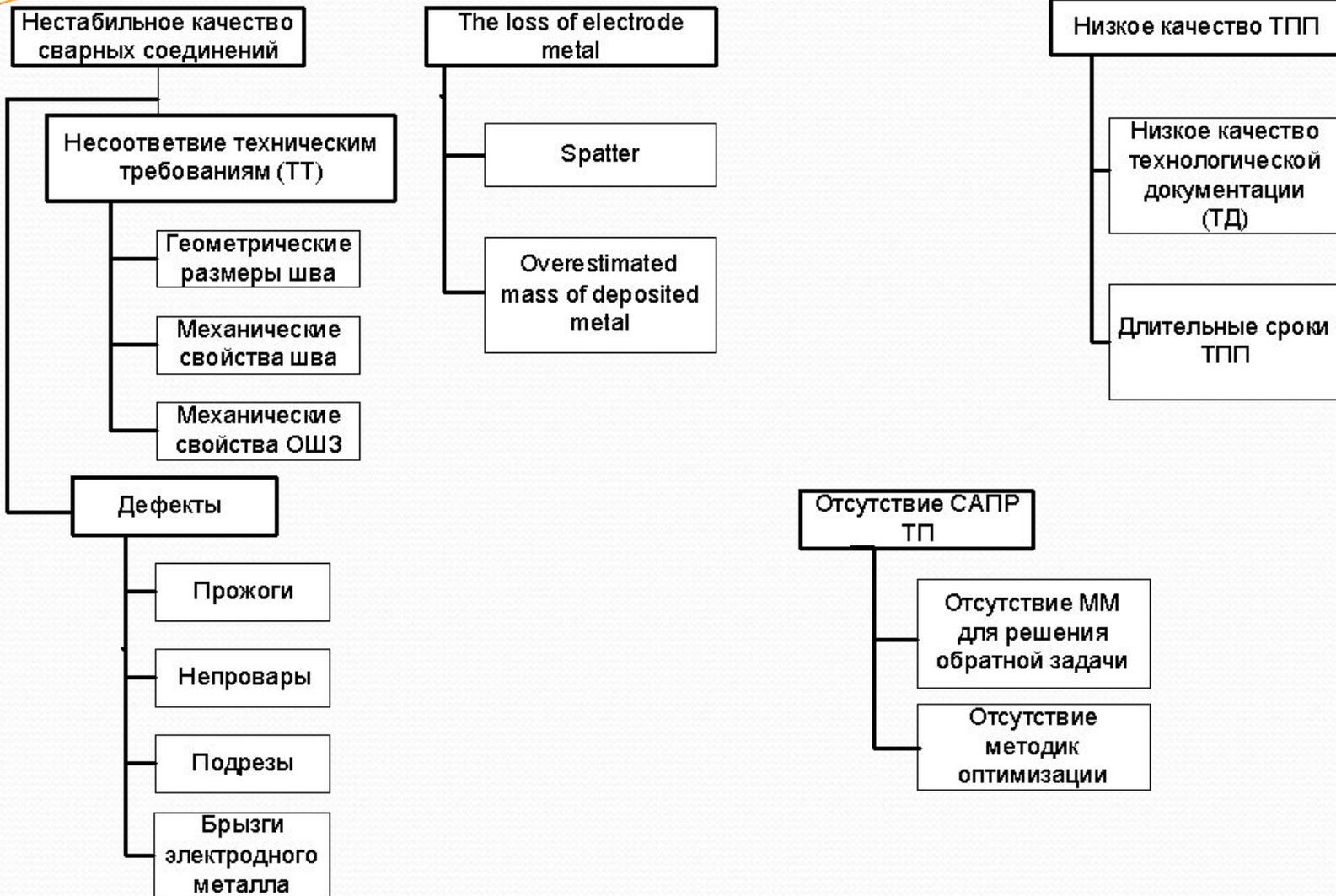


Alexander S. Babkin, Doctor of Technical Science

MATHEMATICAL METHODS OF COMPUTING OPTIMAL WELDING TECHNOLOGY



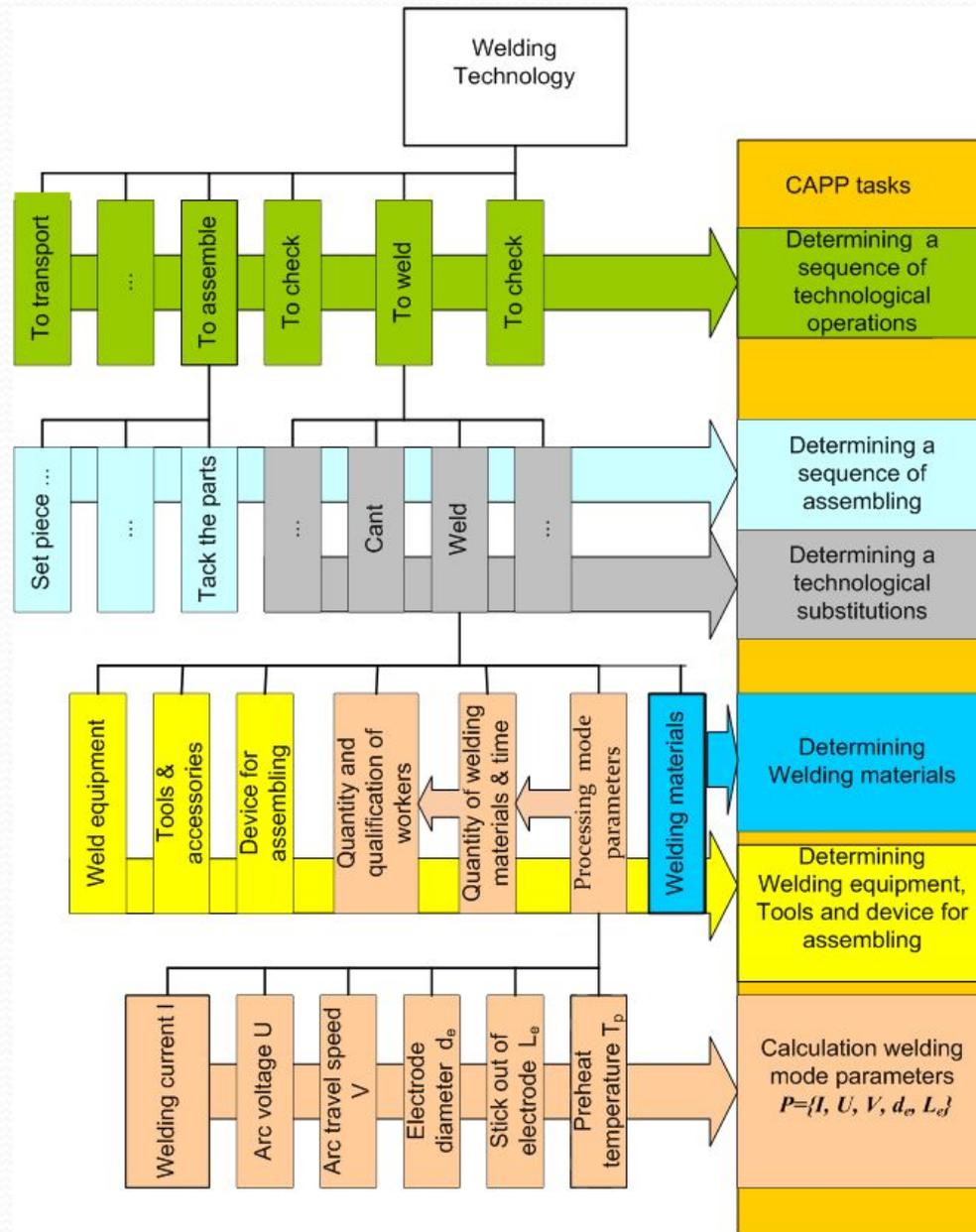
Problems of technology welding of carbon and low alloy steels



Some words about welding procedure

- Welding procedure - The detailed methods and practices involved in the production of a weldment.
- Welding procedure specification (WPS) - A document providing the required welding variables for a specific application to assure repeatability by properly trained welders and welding operators.
- Welding schedule - A written statement, usually in tabular form, specifying values of parameters and the welding sequence for performing a welding operation.
- Welding sequence - The order of making welds in a weldment.
- Welding technique - The details of a welding procedure that are controlled by the welder or welding operator.

Relationship elements technological process with problems CAPP



Direct and reverse tasks



- The mathematical task is: to find suitable processing parameters for given result.
- The result is– the penetration depth of the nail in a wood or a wall
- Processing parameters are:
 - the hammer weight,
 - the height of the falling hammer ,
 - the speed of the falling hammer

Прямая задача:

- Исходные данные: параметры режима обработки:
 - Масса молотка,
 - Высота падения молотка
 - Ускорение молотка
- Выходные данные: глубина погружения гвоздя в дерево или стену

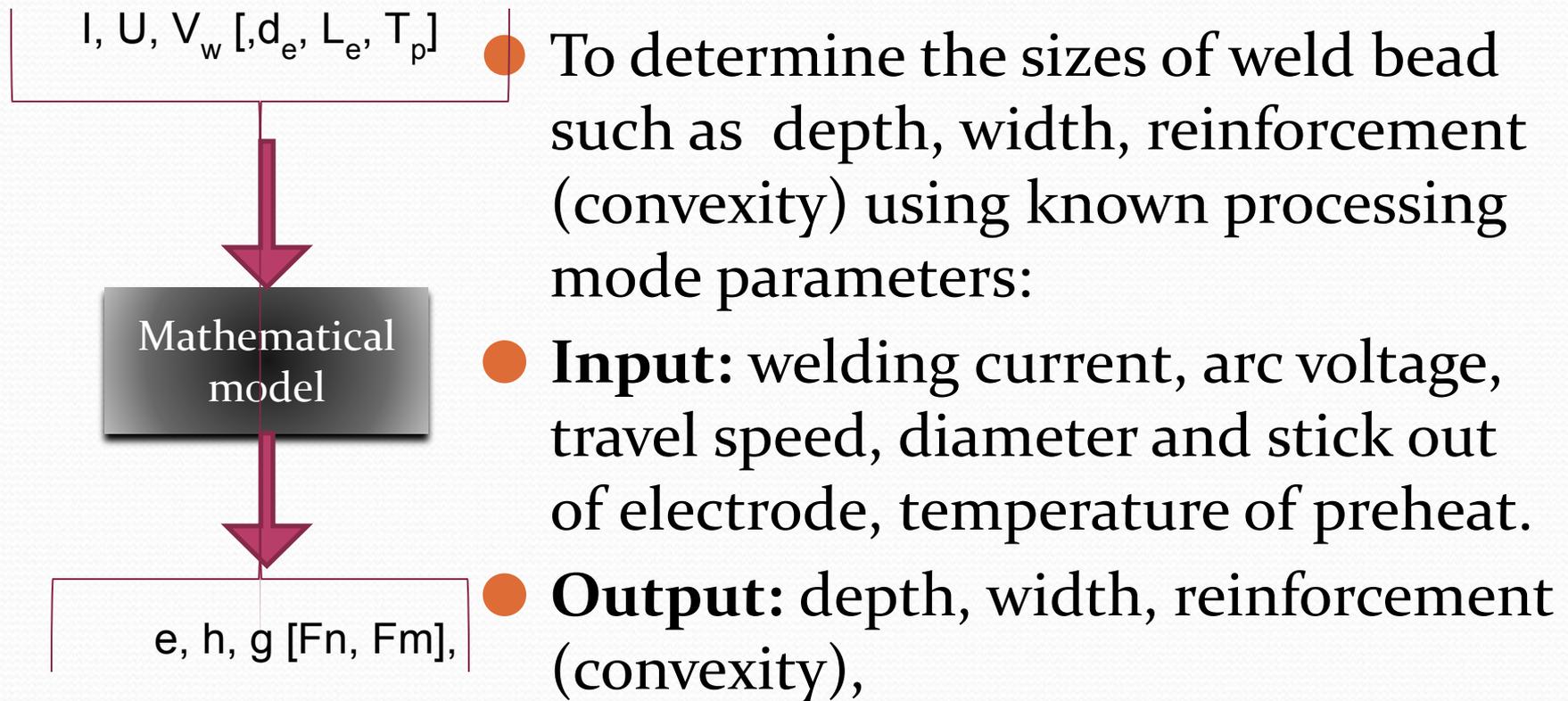
The Direct Task

- **Input:** processing mode parameters:
 - The Hammer Weight
 - The height of the falling hammer
 - The speed of the falling hammer
 - Etc
- **Output:**
 - The depth of the nail into a wood or a wall

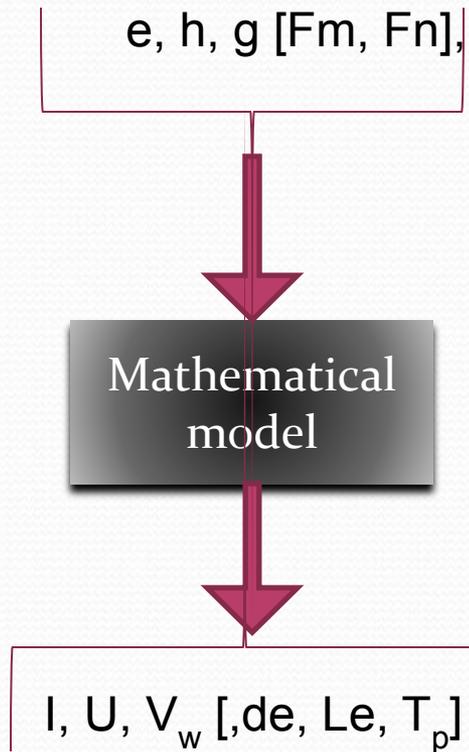
The Reverse Task

- **Input:**
 - The depth of the nail into a wood or a wall
- **Output:** processing mode parameters
 - The Hammer Weight
 - The height of the falling hammer
 - The speed of the falling hammer
 - Etc

The Direct Task of Welding

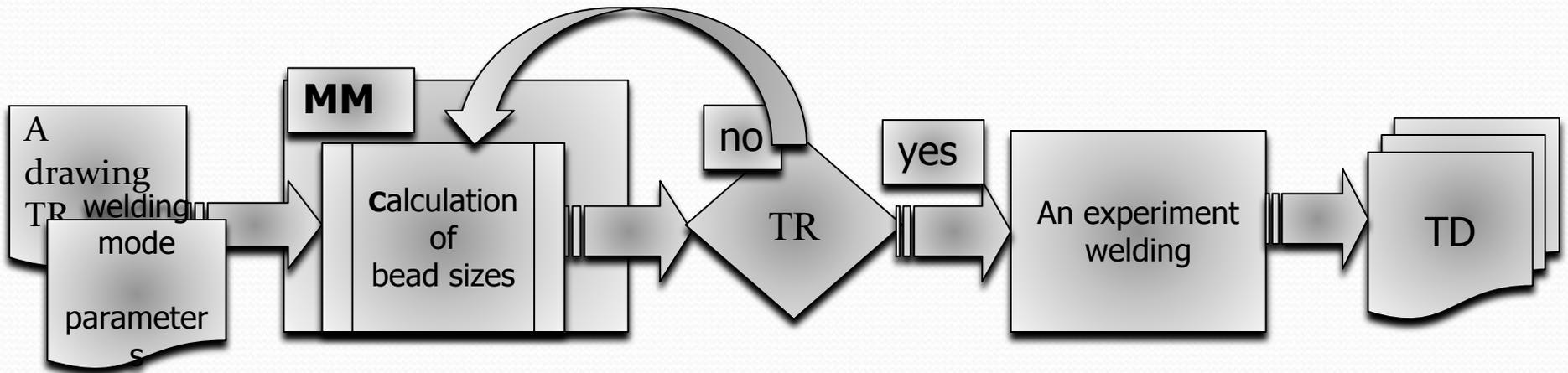
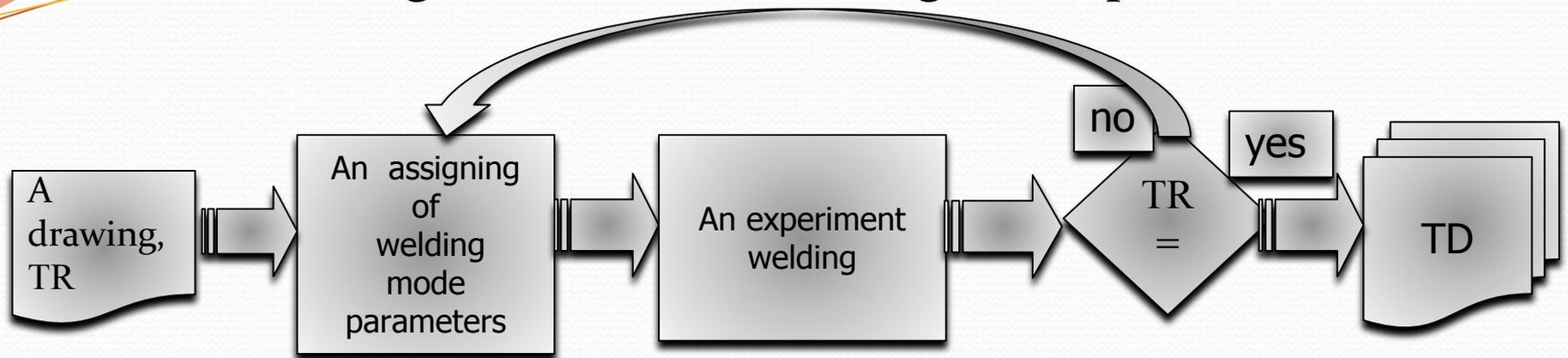


The Reverse Task of Welding

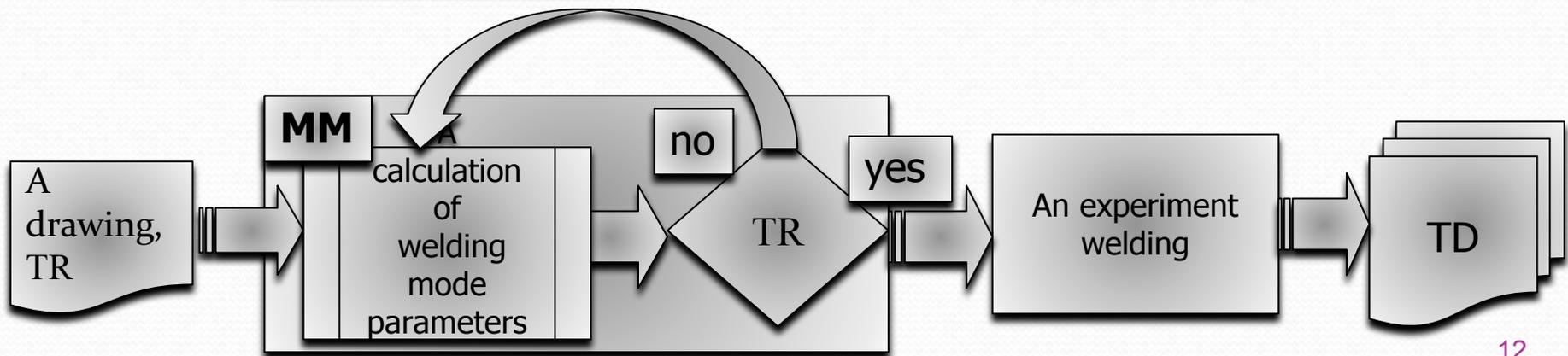
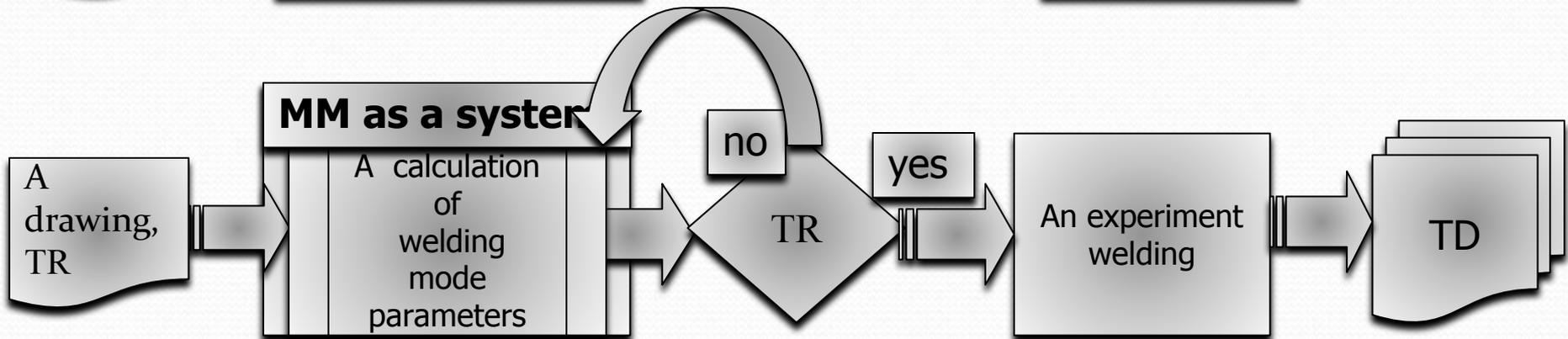
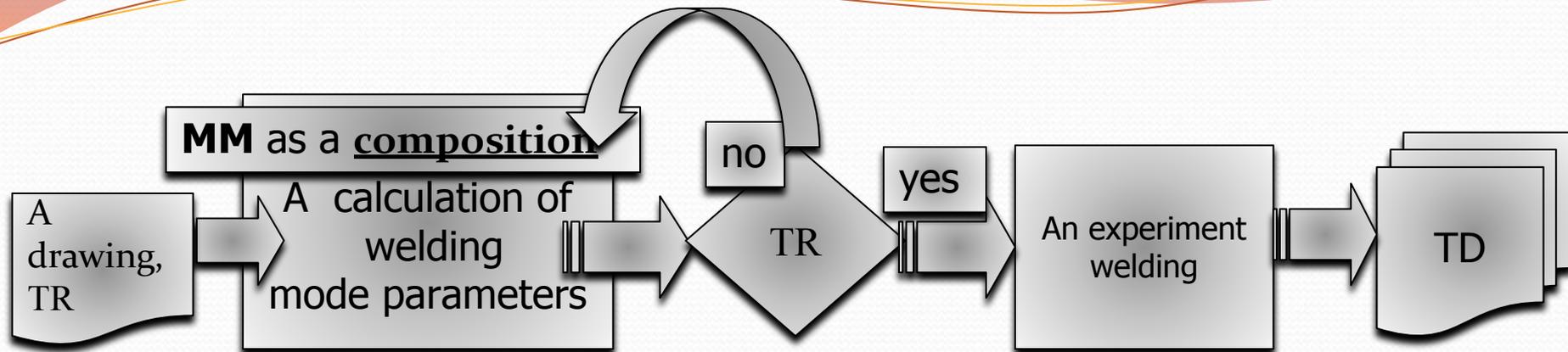


- To determine the processing mode parameters using known sizes of weld bead such as depth, width, reinforcement (convexity):
- **Input:** depth, width, reinforcement (convexity),
- **Output:** welding current, arc voltage, travel speed, diameter and stick out of electrode, temperature of preheat.

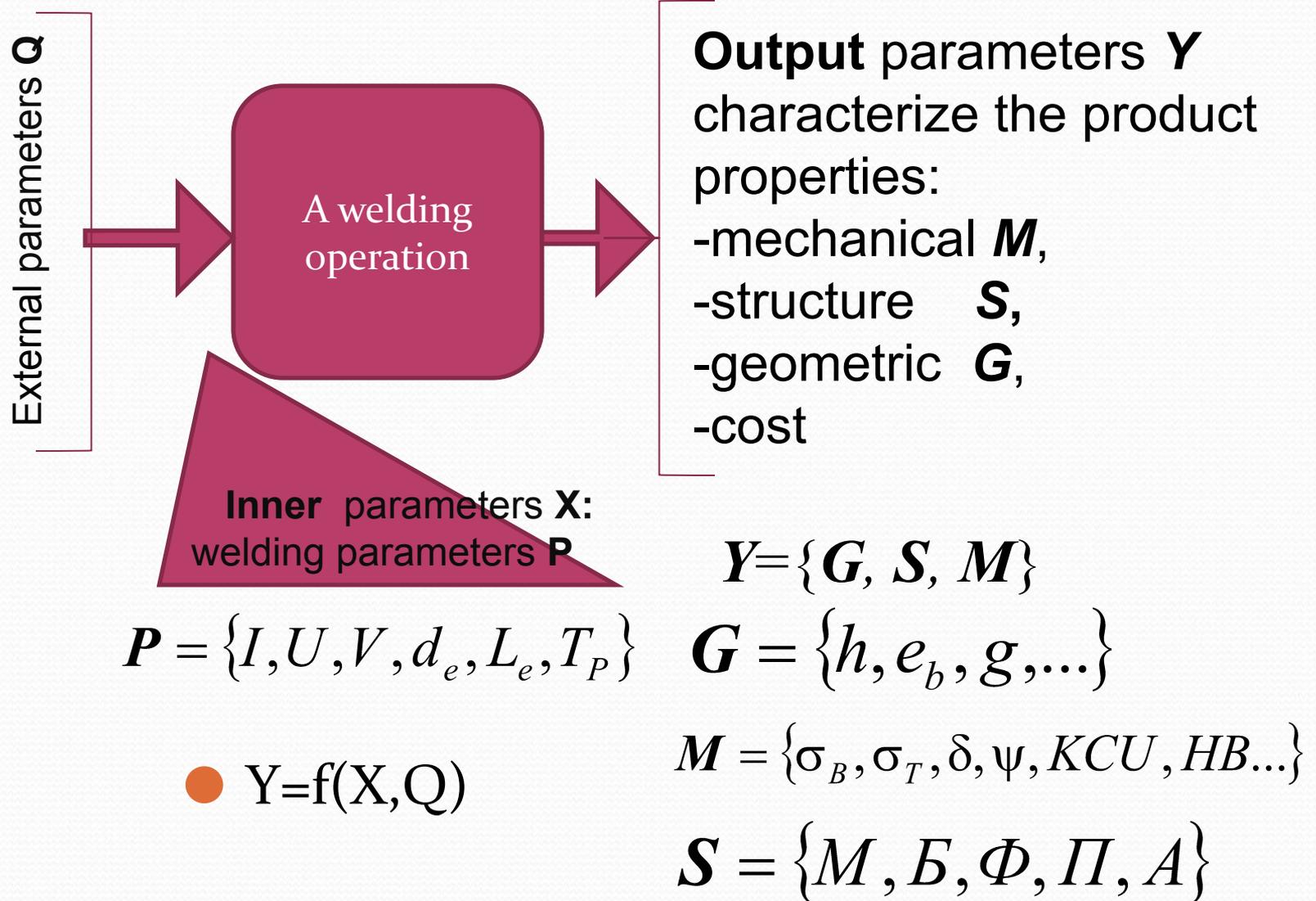
Determining Methods of welding mode parameters



MM – a mathematical model, TR – technical requirements, TD – a technological document



Formulation of problem of calculating the optimum welding parameters



The task of finding the optimum parameters

- **Bead is free from any defects:**

- ✓ Undercuts ,
- ✓ Spatter,
- ✓ burn-through,
- ✓ lack of fusion,
- ✓ cold and hot cracking
- ✓ Etc

- **Optimality criteria are:**

- ✓ Geometric sizes, **G**
- ✓ Mechanical properties, **M**
- ✓ structure **S**

- The absence or limited availability of defects (burn-through, lack of fusion, undercuts, cold and hot cracking, spatter, etc)
- and conformity the output parameters **Y** to **TR** determines the quality of welded construction
- determines the quality of welded construction

$$\mathbf{G} \subset TR_G, \mathbf{S} \subset TR_S, \mathbf{M} \subset TR_M$$

$$TR_G = \{h^{TR}, e_b^{TR}, g^{TR}, \dots\}$$

$$TR_M = \{\sigma_b^{TR}, \sigma_T^{TR}, \delta^{TR}, \psi^{TR}, KCU^{TR}, HB^{TR}, \dots\}$$

$$TR_S = \{M^{TR}, B^{TR}, F^{TR}, P^{TR}, A^{TR}\}$$

goal function $f_0(\mathbf{G}, \mathbf{S}, \mathbf{M}, \mathbf{P}) \rightarrow \min(\max)$

The communication conditions or restrictions:

$$f_i(\mathbf{P}) = 0, f_i(\mathbf{P}) \leq 0.$$

Individual optimality criteria

- Bead Dimensions
 - h -depth of penetration,
 - e_b -bead width,
 - g - bead reinforcement (convexity),
 - F_n - area of bead cross section ,
 - F_m - area of the melting cross section
- HAZ Feathers
 - Amount of
- Process Feathers
 - An Amount of spatter
 - A Cost of welding
 - A Time of welding
 - Disadvantages:

$$\Delta G_i = G_i^{TR} - (G_i \pm \delta G_i)$$

where

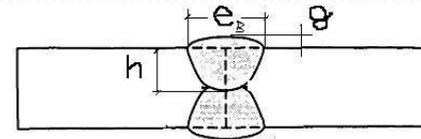
G_{iTR} - the value of the bead size specified by TR,

G_i - the calculated size of the bead,

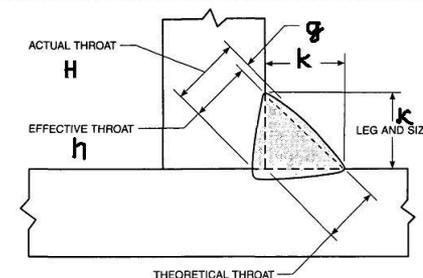
δG_i - confidence interval calculated value of G_i for a given confidence level is determined by its variance. Variance determined by the methods of theory errors.

Complex optimality criterions

- Weld penetrations shape factor (WPSF)
 - $\Psi_m = e_b/h = 1...5$ for **butt joint**
 - $\Psi_m = e_b/(H) = 1...2$, $H = h + g$ for **fillet weld**

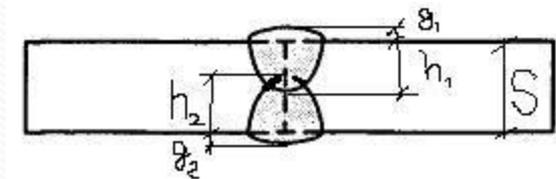


- Weld reinforcement form factor (WRFF)
 - $\Psi_n = e_b/g = 6...12$ for **butt joint**



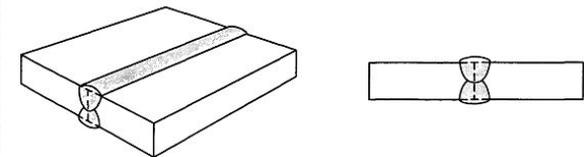
- The overlap factor of the root weld for **double-groove weld**

- Advantages: $\psi_{OFR} = \frac{h_1}{s} + \frac{h_2}{s} = 1,2...1,4$



- The Weld penetrations shape factor (WPSF) affects the resistance of the weld metal hot cracking,

- Weld reinforcement form factor affects on the stress concentration at the transition from the weld to the base metal



Is the shape of a weld important?

- The shape of a weld is important because it can influence the soundness or performance of the joint.
- If a weld is sectioned transversely and then polished and etched, the cross-sectional shape of the weld can be seen. Measurements of the width of the cap and the depth of penetration of individual weld beads, used to make up the joint, can be made. A shape factor, defined by the width to depth ratio, sometimes known as 'form factor', can be determined. This factor is particularly important in MIG/MAG (GMA) and submerged-arc welding where a ratio of 3:2 is optimal for sound welds. A larger ratio, say 3:1, gives shallow beads which are prone to surface cracking, while a smaller ratio, say 1:2, results in centreline cracking. For other processes, which use key-hole techniques (e.g. electron beam welding), the single pass bead may be narrow and deep but still satisfactory.
- Externally, the surface shape can influence both performance and costs. For example, if the weld face has too much excess weld metal, the weld is said to be 'peaked'. This causes a sharp change in section forming notches at the weld toes that act as stress-raisers, promoting early fatigue failure. Excess weld metal also raises the cost of making the weld in terms of both time and consumables, without adding value.
- The required shape and size of a weld is primarily the responsibility of the designer who might be aided and guided by reference to Standards; for example, EN ISO 5817 Arc-welded joints in steel - Guidance on quality levels for imperfections. The welding engineer specifying the welding parameters, the welder and the post-weld inspector also have crucial roles to play in achieving an acceptable weld shape and hence quality.

Formulation of problem of calculating the optimum welding parameters

Each arc welding process operation can be described by vectors relationship

- внешних параметров Q ,
- внутренних параметров X ,
- в том числе, управляемых параметров P
- и выходных параметров Y

$$Y = f(X, Q)$$

Управляемые параметры $P = \{I_{св}, U_{д}, V_{св}, d_{э}, L_{э}, T_{п}\} P \subset X$

Выходные параметры Y характеризуют свойства продукта операции $Y = \{G, S, M\}$

Вектор свойств	механических	$M = \{\sigma_B, \sigma_T, \delta, \psi, KCU, HB...\}$
Вектор геометрических свойств		$G = \{h, e_u, g, \dots\}$
Вектор структурных свойств		$S = \{M, B, \Phi, \Pi, A\}$

Отсутствие или ограниченное наличие дефектов (прожогов, непроваров, подрезов и несплавлений, холодных и горячих трещин, брызг, наплывов) и соответствие выходных параметров Y техническим требованиям (ТТ) определяет **качество сварной конструкции**

$$G \subset TT_G, S \subset TT_S, M \subset TT_M$$

Задача нахождения оптимальных параметров режима

$$\text{Функция цели: } f_0(G, S, M, P) \rightarrow \min(\max)$$

$$\text{Условия связи или ограничения: } f_i(P) = 0, f_i(P) \leq 0.$$

Определение критериев оптимальности сварных соединений из углеродистых и низколегированных сталей

Частные критерии оптимальности:

- глубина проплавления h , $\Delta h = s \cdot m - (h \pm \delta h)$
($m=1$ для С2 и С4, $m=1,2$ для С5, $m=2/3$ для С7)
- ширина шва $e_{ш}$, $\Delta e_{ш} = e_{ш}^{ГОСТ} - (e_{ш} \pm \delta e_{ш})$
- высота выпуклости g , $\Delta g = g^{ГОСТ} - (g \pm \delta g)$
- Содержание мартенсита в ЗТВ
- Коэффициент потерь электродного металла ($K_{п}$)

Функция цели как логическое выражение

(пример для С7 ГОСТ 14771)

$$K_{пр1} \wedge K_{в1} \wedge K_{пр2} \wedge K_{в2} \wedge K_{пк} \wedge K_{п} \rightarrow \Phi$$

где K – предикаты, описывающие комплексные критерии оптимальности, Φ – высказывание «шов качественный»;

\wedge - логическая связка «и»

Комплексные критерии оптимальности:

- Коэффициент формы проплавления ($K_{пр}$),
- Коэффициент формы выпуклости ($K_{в}$),
- Коэффициент перекрытия корня шва ($K_{пк}$)

Преимущества:

- Коэффициент формы проплавления оказывает влияние на стойкость металла шва к горячим трещинам,
 - Коэффициент формы выпуклости оказывает влияние на концентрацию напряжений в месте перехода от шва к основному металлу
- Как частные, так и комплексные критерии качества являются функцией параметров режима**

δx – доверительный интервал расчетной величины x при заданной доверительной вероятности

КОЭФФИЦИЕНТ	Формула	С2, С4, С5, С6	С7	Т1	Т3	Н1, Н2	С8-27, Т6-Т9
формы выпуклости	$\Psi_{в} = \frac{e_{ш}}{g}$	6...10		-	-	-	-
формы проплавления	$\Psi_{пр} = \frac{e_{ш}}{h}$	1,0...5,0		-	-	-	1,0...2,0
формы проплавления	$\Psi_{пр} = \frac{e}{h+g}$	-	-	0,9...2,0		0,9...2,0	-
Перекрытия корня шва	$\Psi_{пк} = \frac{h_1}{s} + \frac{h_2}{s}$	-	1,2...1,4	-	1,2...1,4	-	1,2...1,4

It's understood, both **Individual** and **Complex optimality criteria** are a function of mode parameters!

So we need some equations connected mode parameters and **Individual** or **Complex optimality criteria**.

Thus our aim is to find such equations.

We know two methods of producing such equations:

1. By theory of heat transfer
2. By experiment

$$(T - T_0) = \frac{Q}{\rho C_p (4\pi\alpha t)} e^{\left(\frac{-R^2}{4\alpha t}\right)}$$

Разработка методик решения оптимизационных задач сварочного производства

Методика 1 :

1. Определяют критерии оптимальности (КО)
2. Формулируют функцию цели (ФЦ)
В качестве ФЦ принимают
 - один из критериев оптимальности или
 - свертку критериев оптимальности
3. Образуют условия связи
 - ставшиеся КО используют как условия связи
4. На параметры режима накладывают ограничения:
 - Функциональные, связывающие параметры режима
 - Прямые, ограничивающие параметры режима
5. Полагая, что ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ и условия связи непрерывны и дифференцируемы используют метод неопределенных множителей Лагранжа для нахождения параметров режима, доставляющих экстремум ФЦ

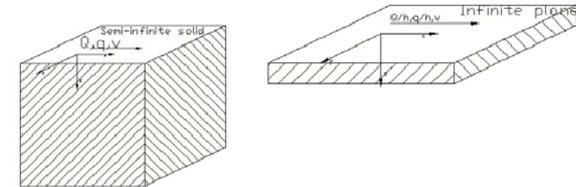
Методика 2 :

1. Определяют критерии оптимальности (КО)
2. Разрабатывают математическую модель в виде системы уравнений, связывающих характеристики плавления основного и электродного металлов, параметры режимов и теплофизические свойства свариваемых материалов и применяемых защитных газов.
3. Формулируют функцию цели (ФЦ)
В качестве ФЦ принимают
 - все критерии оптимальности
4. Определяют управляемые параметры
5. На управляемые параметры накладывают прямые ограничения
6. Разрабатывают итерационный алгоритм расчета параметров режима, доставляющих экстремум ФЦ

Disadvantages and advantages of theory method

Main Disadvantages :

1. This theory describes the thermal (temperature) field near the weld pool is inaccurate.
2. This theory is applied to describe the thermal fields some approximations such as the board, source Point, the infinite board, etc.....



Advantages :

The breadth and universality describing the process of heat distribution

Disadvantages and advantages of experimental method

Disadvantages

1. For the experiment (materials and equipment) and mandatory treatment outcomes requires a significant investment
2. Experiment results depend of the experiment conditions
3. Difficulty in interpreting results (necessary to account for the experimental error) exist

Advantage:

Accuracy of the result (when playing only in the experimental conditions)

The theory Methods of similarity and dimensionality (TSD)

● That is main method of TSD?

- The main method of TSD is the dimensionless complexes , named criteria **similarity** .
- (не путать с ранее введенными критериями оптимальности)

● Examples

- Peclet criterion,
- Fourier criteria

$$\pi_{1(h)} = \frac{h \cdot V_{cs}}{a}$$

$$Fo = \frac{at}{L^2}$$

$$Ha = Bl \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$$

● How we will be use the main method of TSD?

To obtain the relationship between criteria similarity based on the experimental study of the welding processes.

These criteria associate properties of the plasma of arc, the properties of welded steels, weld parameters, electrode and the mode and they allow you to define the characteristics of melting the base metal and formation of the weld, fusion and transfer of electrode metal.

● That is the advantage of TSD?

- Easy to interpret and use
- The area of application of the criteria = latitude to change their values
- + All the advantages of the use of mathematical statistics

Criteria similarity	Form
The Peclet criterion	$\pi_{1(h)} = \frac{h \cdot V_{c6}}{a}$
The N. Khristensen criterion	$\pi_{Cr} = \frac{q \cdot V_{c6}}{(T_{nl} - T_0) \cdot \lambda \cdot a}$
The Kirpichev criterion	$\pi_K = \frac{q}{(T_{nl} - T_0) \cdot \lambda \cdot d_3}$
The criterion of arc pressure	$\pi_{23} = \frac{q^2 \cdot V_{c6}}{((T_{nl} - T_0) \cdot \lambda)^2 \cdot a \cdot d_3}$
The Peclet criterion	$\pi_{1(e)} = \frac{e_b \cdot V_{\tilde{n}\tilde{a}}}{a}$
The Peclet criterion	$\pi_{1(h)} = \frac{\sqrt{F} \cdot V_{\tilde{n}\tilde{a}}}{a}$
	$\pi_{11} = \frac{T_{11} \cdot \lambda \cdot \sigma_s}{\sqrt{H} \cdot \sigma \cdot l^2}$

Experiment conditions

- **Welding method:**
 - Shielded Metal Arc Welding (SMAW) or **MIG-MAG**
- **Material:**
 - **CARBON and LOW ALLOY STEELS**
- **Bead position in space:**
 - flat
- **Stringer bead**
 - not weave bead

The Example of equations for MAG

$$\pi_{1(h)} = e^{-3,674} \cdot \pi_{23}^{0,549}$$

$$R=0,95, R^2=0,9$$

CO₂, d_e=1,6 mm,

$$h = e^{-3,674} \cdot a^{0,451} \cdot \left(\frac{\eta_u}{T \cdot \lambda} \right)^{1,098} \cdot \left(\frac{I_{ce} \cdot U_d}{\sqrt{d_s}} \right)^{1,098} \cdot V_{ce}^{-0,451}$$

Влияние защитной атмосферы на формирование сварного шва

$$\pi_{\text{ш}} = \frac{T_{\text{п}} \cdot \lambda \cdot \sigma_s}{\sqrt{H} \cdot \sigma \cdot l^2}$$

l - line size, de

$T_{\text{п}}$ - the temperature of the plasma (determined experimentally)

λ - thermal conductivity of the plasma,

D - enthalpy of the plasma

σ_s - transport cross section of electron scattering
by atoms and molecules,

σ - the surface tension of the alloy in a gaseous environment.

We investigate influence of CO_2 , Ar, Ar+30% CO_2 , Ar+5% O_2
и CO_2 +30% O_2

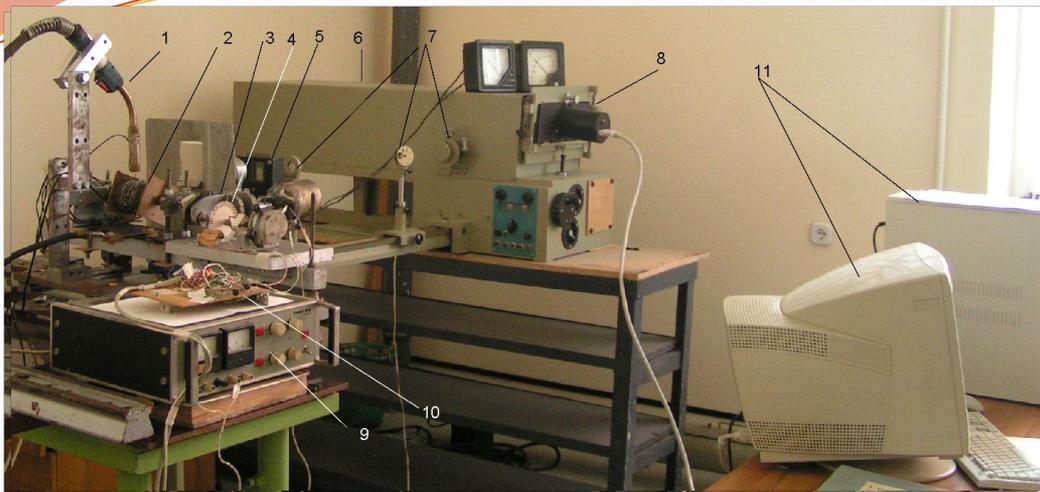
$$\pi_{1(h)} = e^{k_{1h}} \cdot \pi_{23}^{k_{2h}}, \quad \pi_{1(e_{\text{ш}})} = e^{k_{1e}} \cdot \pi_{23}^{k_{2e}}$$

$$k_{1h} = f(\ln(\pi_i) + a)$$

$$k_{2e} = 0,3$$

CO_2 , Ar+30% CO_2 , CO_2 +30% O_2 $k_{2h}=0,5...0,6$

Ar, Ar+5% O_2 $k_{2h}=0,7...0,8$



$$\lg \left(\frac{I\lambda^3}{gf} \right) = B - \frac{5040}{T} E$$

I – интенсивность линии, измеренная опытным путем в условных единицах (отсчетах МОРС);
 g – статистический вес нижнего уровня;
 f – сила осциллятора для эмиссионной линии;
 λ – длина волны ;
 B – постоянная, объединяющая универсальные константы ,
 E – энергия верхнего уровня

$$T = T_e - 40 \cdot x,$$

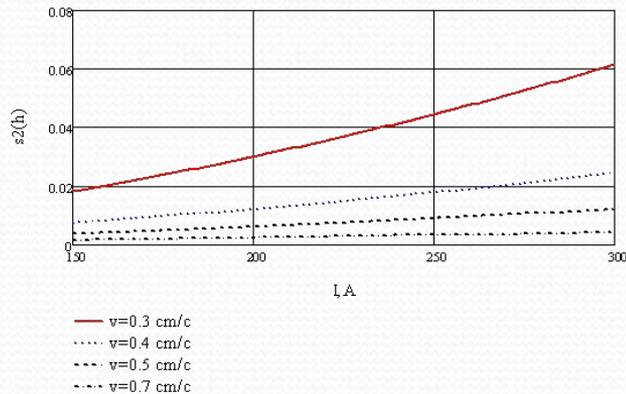
где T_e – температура плазмы основного газа, К (Ar $T_e=8300 \pm 500$, CO₂ $T_e=9000 \pm 200$); x – содержание примеси, % об.

Влияние параметров режима на дисперсию и доверительный интервал расчетной величины h

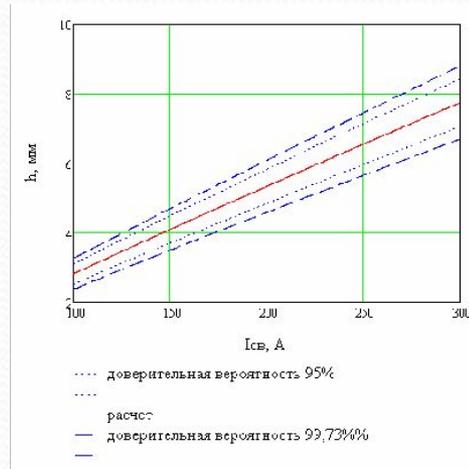
$$h = e^{-1,473} \cdot \left(\frac{I_{св}^{1,37} \cdot 3,65 \cdot \eta_u}{T \cdot \lambda} \right)^{0,67} \cdot \left(\frac{b}{d_3} \right)^{0,335} \cdot \frac{a^{0,33}}{V_{св}^{0,665}}$$

$$s^2(h) = \left(\frac{\partial h}{\partial I_{св}} \right)^2 s^2(I_{св}) + \left(\frac{\partial h}{\partial U_d} \right)^2 s^2(U_d) + \left(\frac{\partial h}{\partial V_{св}} \right)^2 s^2(V_{св})$$

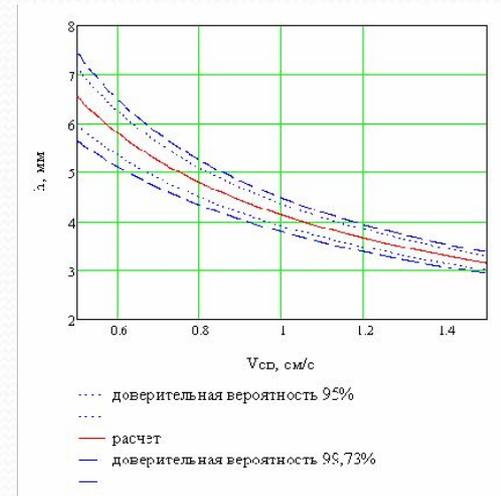
$\Delta I_{св \max} = 10 \text{ A}$, тогда $SD = 10/3 = 3.3 \text{ A}$ и дисперсия силы сварочного тока $s^2(I_{св}) = 11$
 $\Delta U_d \max = 2 \text{ В}$, тогда $SD = 2/3 = 0.667 \text{ В}$ и дисперсия $s^2(U_d) = 0.444$,
 $\Delta V_{св \max} = 0,1 \text{ см/с}$, то $SD = 0,1/3 = 0,03 \text{ см/с}$ и ее дисперсия $s^2(V_{св}) = 10^{-3}$.



а). Влияние параметров режима на дисперсию расчетной величины h : $d_3 = 1,2 \text{ мм}$



б) Влияние $I_{св}$ на доверительный интервал расчетной величины h : $V_{св} = 0,5 \text{ см/с}$, $d_3 = 1,2 \text{ мм}$

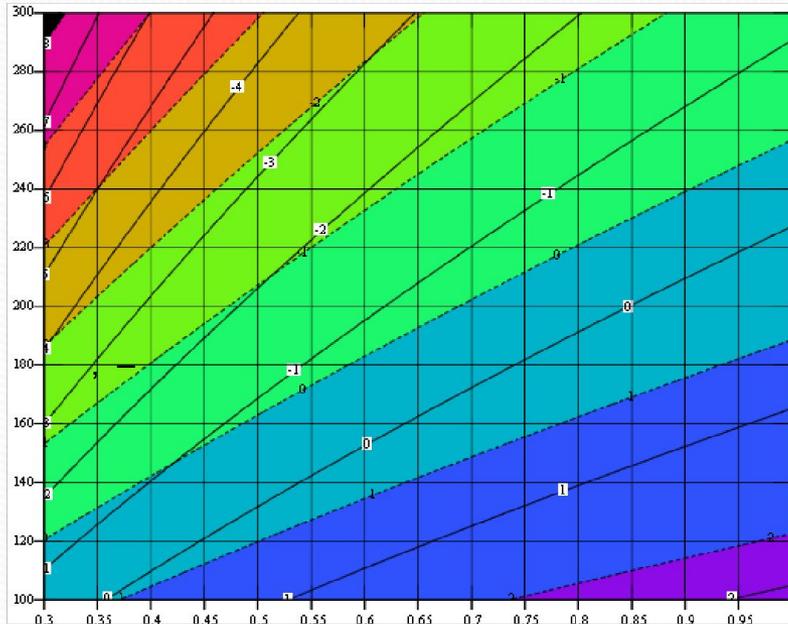


в) Влияние $V_{св}$ на доверительный интервал расчетной величины h : $I_{св} = 250 \text{ A}$, $V_{св} = 0,5 \text{ см/с}$, $d_3 = 1,2 \text{ мм}$

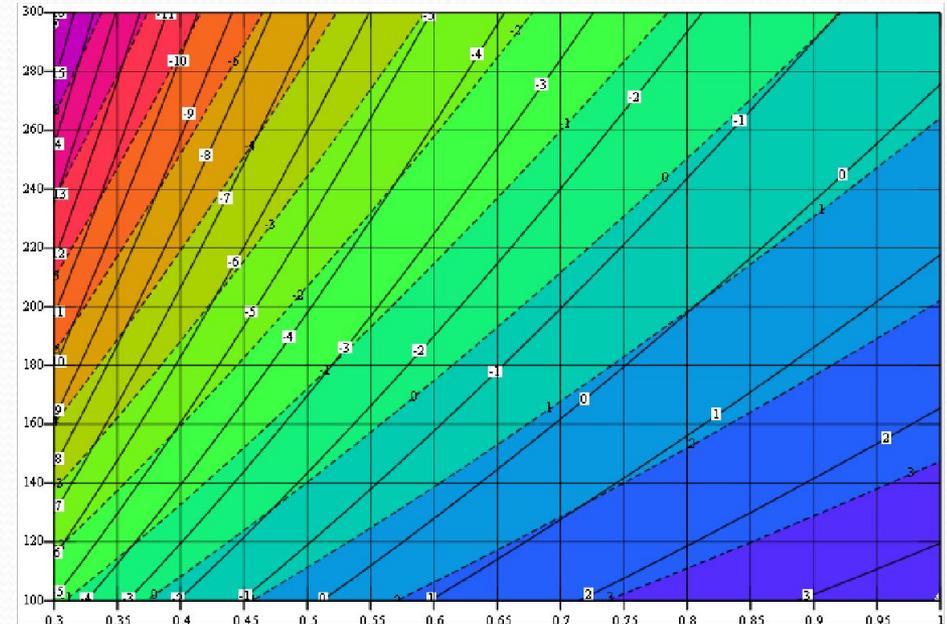
Private optimality criteria for joints C2, C7: Depth of penetration & bead width, s=4 mm

$$\Delta h = s \cdot m - (h \pm \delta h)$$

$$\Delta e_{\sigma} = e_{\sigma}^{\dot{\sigma}R} - (e_{\sigma} \pm \delta e_{\sigma})$$



M1h, M2h



M1Δe, M2Δe

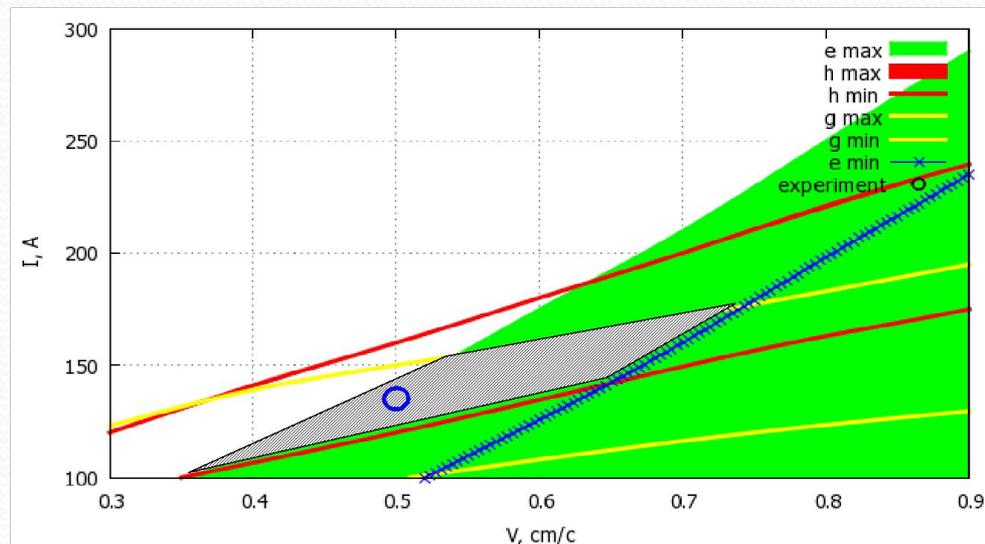
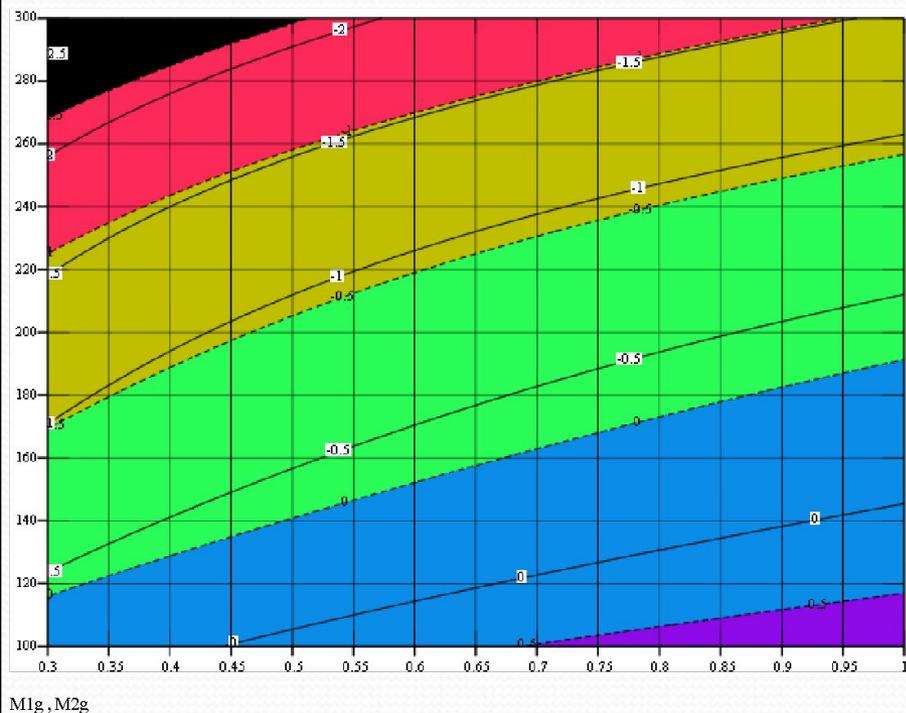
«depth of penetration» at a confidence level 95%:
 s=4 mm, b=1 mm, d=1.2 mm, --- $\Delta h = s \cdot m - (h + \delta h)$
 - $\Delta h = s \cdot m - (h - \delta h)$

«bead width» at a confidence level 95%:
 s=4 mm, b=1 mm, d=1.2 mm, --- $\Delta e_{\sigma} = e_{\sigma}^{TR} - (e_{\sigma} + \delta e_{\sigma})$
 - $\Delta e_{\sigma} = e_{\sigma}^{\dot{\sigma}R} - (e_{\sigma} - \delta e_{\sigma})$

burn-through is reflected by negative values
 lack of fusion is reflected by positive values,

Private optimality criteria for joints C2, C7: reinforcement

$$\Delta g = g^{\text{OR}} - (g \pm \delta g)$$



○ - experiment welding butt **square** C2,
s=4 mm, b=1 mm, d=1.2 mm, L=12 mm

«reinforcement» 95%: at a confidence level 95%

s=4 mm, b=1 mm, d=1.2 mm, L=12 mm, ---

$$\Delta g = g^{\text{ROCT}} - (g + \delta g)$$

$$- \Delta g = g^{\text{ROCT}} - (g - \delta g)$$

$$g = \frac{\alpha_p I_{\text{CB}} (1 - \psi_{\text{II}})}{\gamma V_{\text{BCI}} \mu_B e_{\text{III}}} - \frac{h(b - \Delta b)}{\mu_B e_{\text{III}}}$$

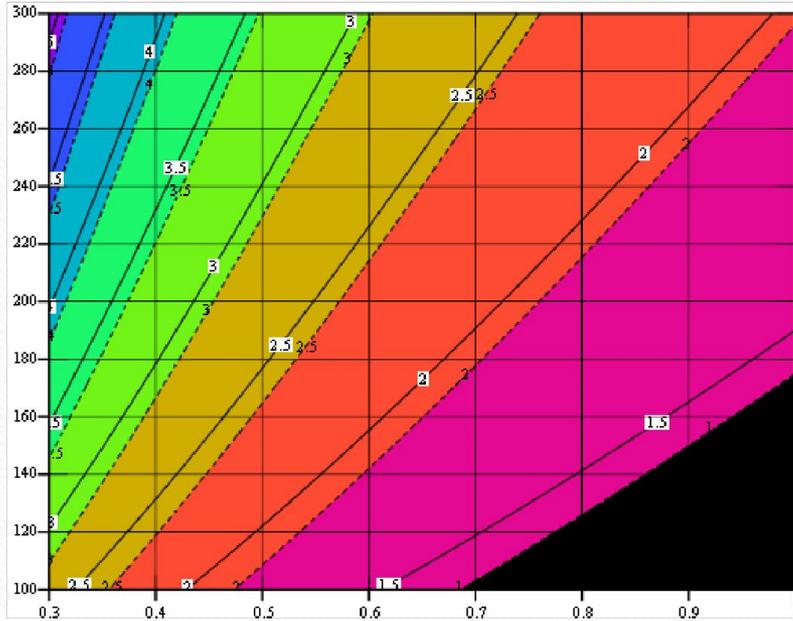
Complex optimality criteria for joint C2, at a confidence level 95%

Weld penetrations shape factor (WPSF) $\Psi_{np} = \frac{e_{III}}{h}$

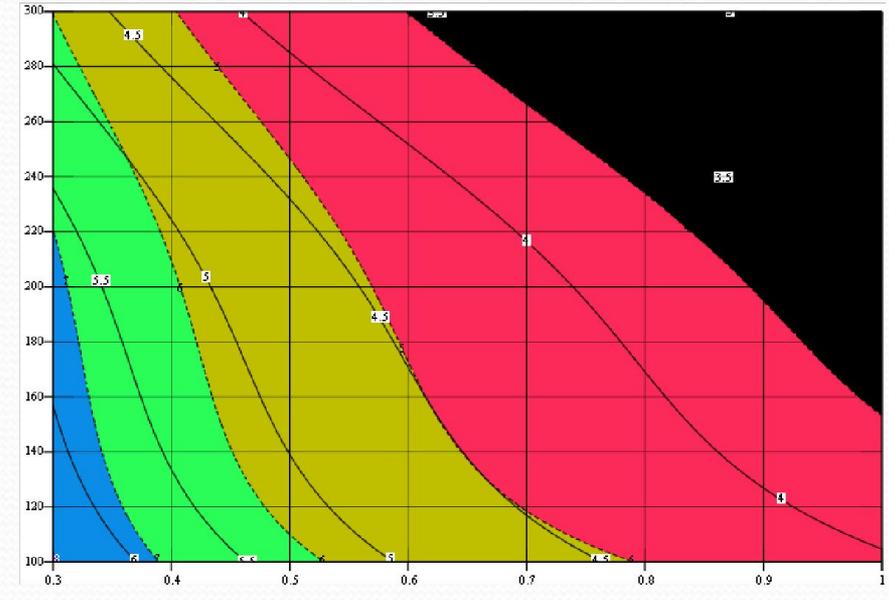
--- $(\Psi_{i\delta} + \delta\Psi_{i\delta}),$ - $(\Psi_{i\delta} - \delta\Psi_{i\delta})$

Weld reinforcement form factor (WRFF) $\Psi_B = \frac{e_{III}}{g}$

--- $(\Psi_{\dot{a}} + \delta\Psi_{\dot{a}}), -(\Psi_{\dot{a}} - \delta\Psi_{\dot{a}}),$



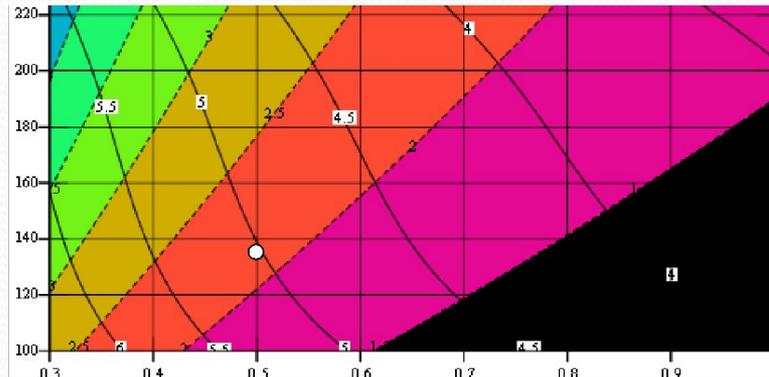
MI Φ4, M2 Φ4



R1 Φ, R2 Φ

Area of quality formation of joint C2 at a confidence level 95%: s=4 mm, b=1 mm, d=1.2 mm, L=12 mm

--- $\Psi_{np}, - \Psi_{\epsilon}$



Исследование и моделирование формирования подрезов и несплавлений

Использовали критерии подобия

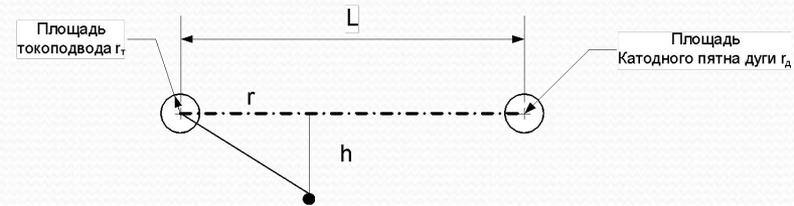
$$Ha = Bl \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$$

- критерий Хартмана (B – магнитная индукция,
η – динамическая вязкость,
σ – удельная электропроводность)

$$\pi_{Cr} = \frac{q \cdot V_{св}}{(T_{nl} - T_0) \cdot \lambda \cdot a}$$

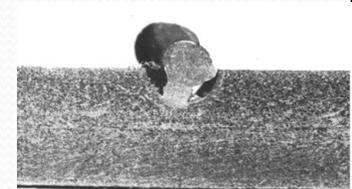
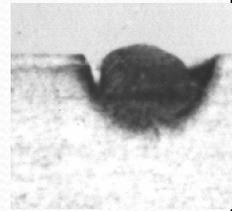
Напряженность магнитного поля в свариваемом изделии

$$H = \frac{\sigma r_d r_T \cdot \Delta \phi}{2h(r_d + r_T)} \left(\left(1 - \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) + \left(1 - \frac{L-r}{\sqrt{(L-r)^2 + h^2}} \right) \right)$$



Использовали экспериментальные данные:

- - качеств. швы, УП, данные автора
- - качеств. швы, Аф, данные С.Л. Мандельберга
- - подрезы, УП, данные автора
- - подрезы, Аф, данные С.Л. Мандельберга
- ◇ - несплавления, УП, данные автора
- ◆ - несплавления, УП, данные С.Л. Мандельберга
- △ - неустойчивый процесс, УП, данные автора



○ - подрезы (УП и Аф); □ - несплавления (УП); ◇ - неустойчивый процесс (УП)

$$\ln Ha_{кр} = \ln Cr^b + c$$

где b=0,972±0,026; c=-6,890±0,298

Моделирование температурного поля

Приняли, что сварочный источник теплоты является суммой трех источников с учетом теплоты плавления основного и электродного металла :

- сварочной дуги,
- ванны жидкого металла,
- металла сварного шва

Температурное поле сварочной дуги и ванны жидкого металла

$$T(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2r_0} \frac{q_{\max} A \frac{r}{\sqrt{2\pi r_0}} e^{-\frac{r^2}{2r_0^2}}}{2\pi R(x+r \cos \varphi, y+r \sin \varphi, z) \lambda} e^{-V_{\text{св}} \frac{x+r \cos \varphi + R(x+r \cos \varphi, y+r \sin \varphi, z)}{2a}} dr d\varphi$$

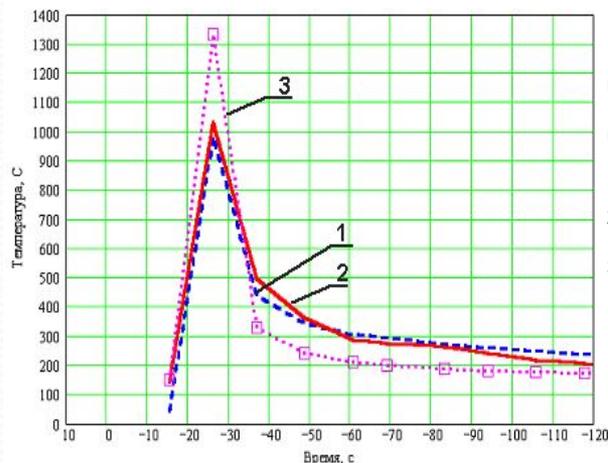
$$A = \frac{1}{2\pi \int_0^{2r_0} \frac{r}{\sqrt{2\pi r_0}} e^{-\frac{r^2}{2r_0^2}} dr}$$

Температурное поле металла сварного шва

$$T_{\text{ш}}(x, y, z) = \int_{-\frac{e_{\text{ш}}}{2}}^{\frac{e_{\text{ш}}}{2}} \int_{-L_{\text{ш}}}^{-L_{\text{ш}}^*} \frac{q_{\text{ш}} A \sqrt{x^2 + y^2} \frac{(y^*)^2}{e_{\text{ш}}} \cdot x^* \frac{(x^* + 4r_0)^2}{e_{\text{ш}}}}{\sqrt{2\pi e_{\text{ш}}} 2\pi R(x+x^* + 4r_0, y+y^*, z) \lambda} e^{-V_{\text{св}} \frac{x+x^* + 4r_0 + R(x+x^* + 4r_0, y+y^*, z)}{2a}} dx^* dy^*$$

$$A = \frac{1}{\int_{-\frac{e_{\text{ш}}}{2}}^{\frac{e_{\text{ш}}}{2}} \int_{-L_{\text{ш}}}^{-L_{\text{ш}}^*} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{2\pi e_{\text{ш}}}} e^{-\frac{(y^*)^2}{e_{\text{ш}}}} \frac{x^*}{e_{\text{ш}}} e^{-\frac{x^* + 4r_0}{e_{\text{ш}}}} dx^* dy^*}$$

$$T(x, y, z) = T_{\text{д}}(x, y, z) + T_{\text{в}}(x+2r_0, y, z) + T_{\text{ш}}(x, y, z)$$



Сравнение термических циклов:

наплавка на сталь 12Х1МФ

- 1 – расчет по предлагаемому уравнениям;
- 2 - экспериментальные данные;
- 3 - расчет по уравнению Н.Н.Рыкалина

Сравнение расчетных и экспериментальных значений глубины ЗТВ $h_{\text{ЗТВ}}$ и ширины $e_{\text{ЗТВ}}$

$$\varepsilon = \frac{V(\tau)}{V_{\max}} = 1 - \exp(-k\tau^n)$$

-относительная объемная доля новой фазы V (соотношение Авраами),
 k – константа реакции, V_{\max} – максимально возможная объемная доля новой фазы

$$V(\tau) = V_0 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\int_0^{\tau} G(\tau) \cdot \varphi(\tau) \cdot d\tau\right) \right\}$$

Уравнение Колмогорова-Мела-Авраами
 $G(\tau)$ – скорость зарождения центров кристаллизации;
 $\varphi(\tau)$ – объем, занятый зерном новой фазы в момент времени τ

$$k\tau^n = \exp\left(4\pi \cdot \int_0^{\tau_k} v_{oz} \left(\int_{\tau_{обр}}^{\tau_k} v_{pz}^{n-1} \cdot \tau^{n-2} d\tau\right) d\tau_{обр}\right)$$

v_{oz} – скорость образования центров новой фазы;
 v_{pz} – скорость движения межфазной границы (роста центров новой фазы);

τ_k – полное время превращения; $\tau_{обр}$ – момент образования центра новой фазы.

$$v_{oz} = C'_2 \exp\left(-\frac{B}{RT(Ac - T)}\right) \quad v_{pz} = C''_2 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \text{где } B = (n-1)Q \frac{(Ac - T_n)^2}{2T_n - Ac}$$

$$C_2 = \ln\left(\frac{-\ln\left(1 - \frac{V_0}{V_{\max}}\right)}{\tau_n^n}\right) + \frac{(n-1)}{RT}Q + \frac{(n-1)}{RT}Q \cdot \frac{Ac_3 - T_n}{T_n - (Ac_3 - T_n)} \quad C_2 = \ln(C'_2 + C''_2)$$

Q – энергия активации движения межфазных границ;
 Ac – соответствующая критическая температура (для бейнита принимается равной Ac_3);
 T – текущая температура исследуемой точки ОШЗ во время охлаждения;
 T_n – температура минимальной устойчивости аустенита;
 B – кинетический параметр, учитывающий энергию образования критического зародыша

$$\Phi = \int_0^{\tau_k} \frac{d}{d\tau}(-\varepsilon_{\Phi}) \cdot \varepsilon_K \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_B \varepsilon_M d\tau \quad K = \int_0^{\tau_k} \frac{d}{d\tau}(-\varepsilon_K) \cdot \varepsilon_{\Phi} \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_B \varepsilon_M d\tau$$

$$\Pi = \int_0^{\tau_k} \frac{d}{d\tau}(-\varepsilon_{\Pi}) \cdot \varepsilon_K \varepsilon_{\Phi} \varepsilon_B \varepsilon_M d\tau \quad B = \int_0^{\tau_k} \frac{d}{d\tau}(-\varepsilon_B) \cdot \varepsilon_{\Phi} \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_K \varepsilon_M d\tau$$

Сталь 12X1M1Φ [5]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	$A_1 - A_3$	t_H
0,13	0,32	0,63	0,95	0,86	0,19	780-925	960

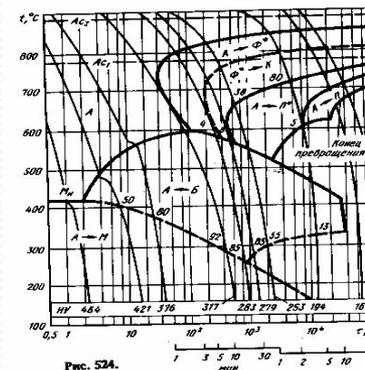
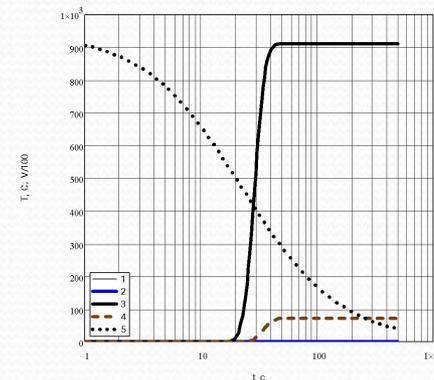
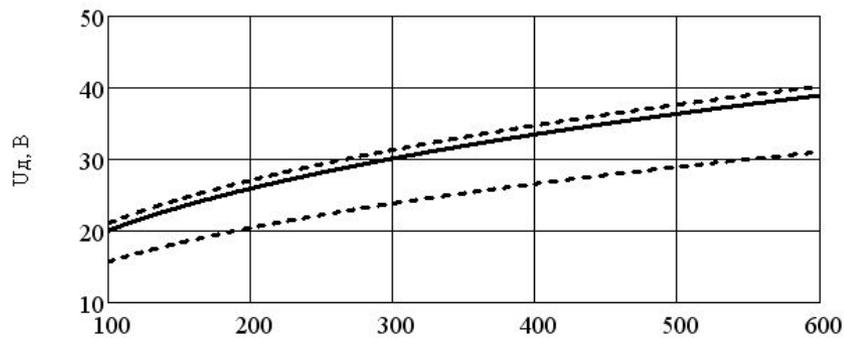


Рис. 524.



Рассчитанное изменение структурного состава стали 12X1M1Φ при термическом цикле опыта 5 в сравнении с термокинетической диаграммой (выше):
 объемные доли 1 – феррита (0%), 2 – перлита (0%), 3 – бейнита (91,1%), 4 – мартенсита (7,3%); 5 - температура

The functional Limitations $U_d = f(I_{cb})$: of electrode metal transfer



- расчет
- - - верхняя граница, Н.М. Новожилов
- · - · нижняя граница, Н.М. Новожилов

$$U_d = U_0 + aI_{cb}$$

$$U_d = 3,65 \cdot I_{cb}^{0,37}$$

transfer of electrode metal ○ – short circuits , ◇ – droplets
 without short circuits, □ – spray,
 Δ – погруженной дугой

A critical current during welding in argon

$$I_{кр} = f(\gamma, T, \rho, L_э, c, H, \sigma, \lambda)$$

где $I_{кр}$ - the force the critical current, γ – density of the metal electrode; T -melting point; ρ -specific electric resistance; $L_э$ - the sickout of electrode (or electrode diameter), c -specific heat, H - latent heat of fusion; σ - latent heat of fusion; λ - thermal conductivity.

$$\pi'_3 = \frac{I^2 \rho}{\sqrt{H \cdot L^2 \cdot \sigma}} \quad \pi_{12} = \frac{4L_э^2 \cdot \gamma H}{\pi d_э^2 \cdot \sigma}$$

For Св-08Г2С

$$\ln(\pi 3) = 12,801 - 0,741 \cdot \ln(\pi 12)$$

$$I_{кр} = \sqrt{e^{12,801} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_э^2}{4 \cdot \gamma}\right)^{0,741} \cdot \frac{\sigma^{1,741}}{\rho \cdot L_э^{0,223} \cdot H^{0,241}}}$$

For Св-06Х18Н9Т

$$\ln(\pi 3) = 14,019 - 0,715 \cdot \ln(\pi 12)$$

For Св-АМц

$$\ln(\pi 3) = 10,21 - 0,673 \cdot \ln(\pi 12)$$

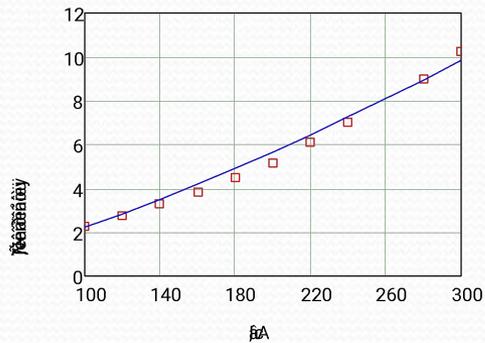
Electrode material	$d_э$, мм	Experiment $I_{кр}$, А	Calculated $I_{кр}$, А
Al	1,2	95...105 /100	106...110
	1,6	120...140 /130	130...133
	2,0	135...160 /145	150...155
Св-АМц	1,6	180	188
	2,0	225	219
M1	1,2	120...140	141
	1,6	150...170	171
	2	180...200	199
	2,5	230..250	231
X18H8T	1,2 (15)	190...220/190	218
	2,0 (18)	300	310
	2,5 (30)	320...330/320	351
Св-08Г2С	1,2(10)	230...250/220	214
Св-08Г2С	1,6(15)	260...280/260	251

The Research and modeling of fusion welding wire

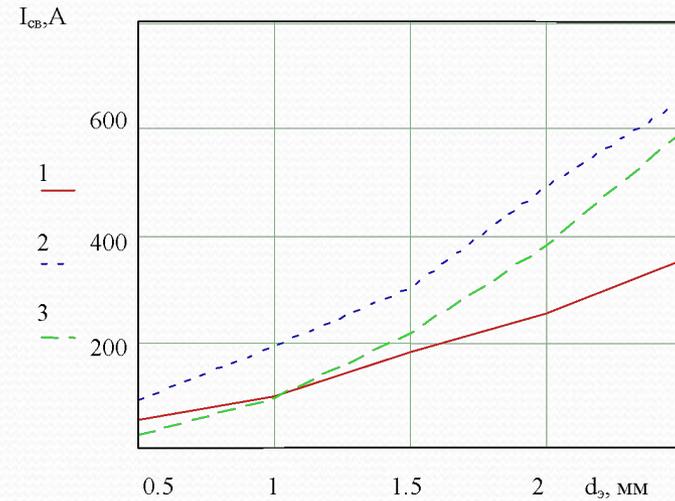
Effect of current density and the electrode stickout on melt ratio of electrode wire (speed of melting)

Effect of current density on the electrode wire loss coefficient

$$\alpha_L = a_1 \cdot I_{ce}^{a_2} \cdot \left(\frac{L_3}{d_3^2}\right)^{a_3} \quad V_{ml} = (0,55 \pm 0,05) \cdot \frac{1}{\gamma \cdot F_3 \cdot k} I_{ce}^{1,365 \pm 0,05} \cdot \left(\frac{L_3}{d_3^2}\right)^{0,31 \pm 0,09}$$



Comparison of the calculated (-) and Experimental (□) melting rate Vpp welding wire : CO₂,
d₃=1,2 mm, L₃=13 mm



1,2 - The normal range of currents, the recommended Novozhilov NM, 3 - calculated

Пример применения методик

Required to calculate the parameters of the regime, which minimizes the time the connection of multi-pass welding in providing

- Penetration depth (h) of the previous layer of 2 mm,
- Set the cooling rate of the HAZ

Optimality criteria are

- ongoing operation (arc time)
- h = 2 mm.
- cooling rate

S-area cutting edge of joint,
i-th pass,

Fi - an area of i-th pass,

Lsh - the length of the connection,

N - the number of passes

$$N = \frac{S}{F_i} \quad t_i = \frac{L}{V_{icB}} \quad F_i = \frac{\alpha_p \cdot I_{cB}}{\gamma \cdot V_{cB}}$$

mathematical linking condition

$$h = e^{-3,676} \cdot a^{0,451} \cdot \left(\frac{\eta}{T \cdot \lambda} \right)^{1,098} \cdot \left(\frac{I_{\tilde{n}a} \cdot U_{\tilde{a}}}{\sqrt{d_y}} \right)^{1,098} \cdot V_{\tilde{n}a}^{-0,451}$$

$$\left(2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \gamma^{x_1} \cdot \left(\frac{V_{\tilde{n}a} \cdot \delta^{x_2}}{I_{\tilde{n}a} \cdot U_{\tilde{a}}} \right) \cdot (T - T_i)^{x_4} \right) - \omega = 0$$

direct constraints:

$$I_{cB \min} < I_{cB} < I_{cB \max}$$

$$V_{cB \min} < V_{cB} < V_{cB \max}$$

functional constraints:

$$U_{\tilde{a}} = 3,65 \cdot I_{\tilde{n}a}^{0,37}$$

$$I_{cB \min} = 100A \quad I_{cB \max} = 600A$$

$$V_{cB \max} = 2 \text{ cm/c} \quad V_{cB \min} = 0,3 \text{ cm/c}$$

$$Nt = \frac{S \cdot \gamma \cdot L}{I_{cb}^{1,32} \cdot d_9^{-0,64} \cdot I_9^{0,38}} \rightarrow \min$$

$$e^{-3,676} \cdot a^{0,451} \cdot \left(\frac{\eta}{T \cdot \lambda}\right)^{1,098} \cdot \left(\frac{I_{cb} \cdot U_d}{\sqrt{d_9}}\right)^{1,098} \cdot V^{-0,451} - h = 0$$

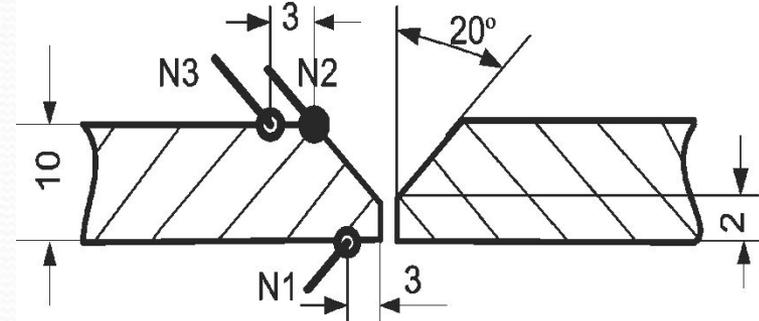
$$\left(2 \cdot \pi \cdot \lambda_i \cdot c \gamma^{x_1} \cdot \left(\frac{V_{cb} \cdot \delta^{x_2}}{I_{cb} \cdot U_d}\right)^{x_3} \cdot (T - T_n)^{x_4}\right) - \omega = 0$$

$$600 - I_{cb} - i_1^2 = 0$$

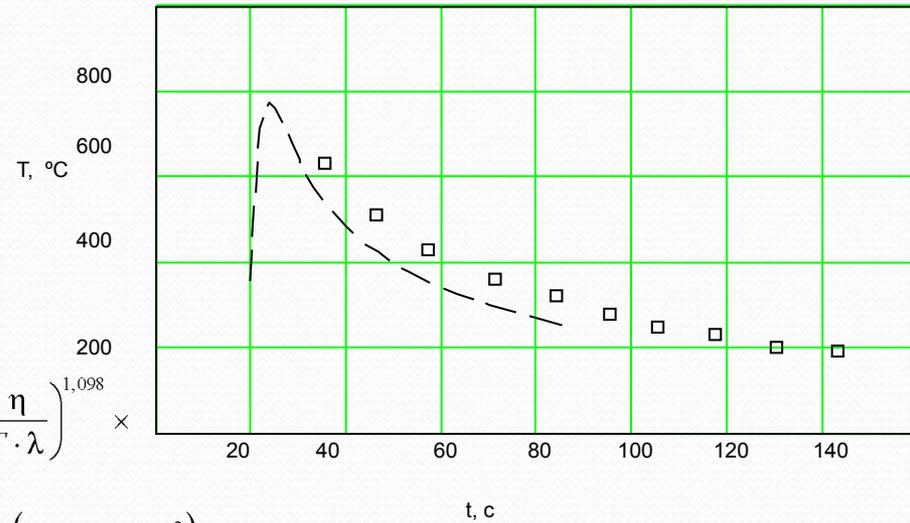
$$I_{cb} - 100 - i_2^2 = 0$$

$$V_{cb} - 0,3 - v_2^2 = 0$$

$$2 - V_{cb} - v_1^2 = 0$$



C17 ГОСТ 14771, образец из стали 09Г2С размером 300x200x10 мм.



y=7 мм(точка №2): □ – эксперимент, — расчет

The corresponding Lagrangian

$$L(V_{cb}, I_{cb}, i_1, i_2, v_1, v_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = \frac{F \cdot \gamma \cdot L}{I_{cb}^{1,32} \cdot d_9^{-0,64} \cdot I_9^{0,38}} + \lambda_1 \cdot \left[e^{-3,674} \cdot a^{0,451} \cdot \left(\frac{\eta}{T \cdot \lambda}\right)^{1,098} \times \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{I_{cb}^{1,37} \cdot 3,65}{\sqrt{d_9}}\right)^{1,098} \cdot V_{cb}^{-0,451} - h \right] + \lambda_2 \cdot (600 - I_{cb} - i_1^2) + \lambda_3 \cdot (I_{cb} - 100 - i_2^2) + \lambda_4 \cdot (V_{cb} - 0,3 - v_2^2) +$$

$$+ \lambda_5 \cdot (2 - V_{cb} - v_1^2) + \lambda_5 \cdot \left[\left(2\pi\lambda c \gamma^{x_1} \left(\frac{V_{cb} \cdot \delta^{x_2}}{I_{cb} \cdot U_d}\right)^{x_3} \cdot (T - T_n)^{x_4} \right) - \omega \right]$$

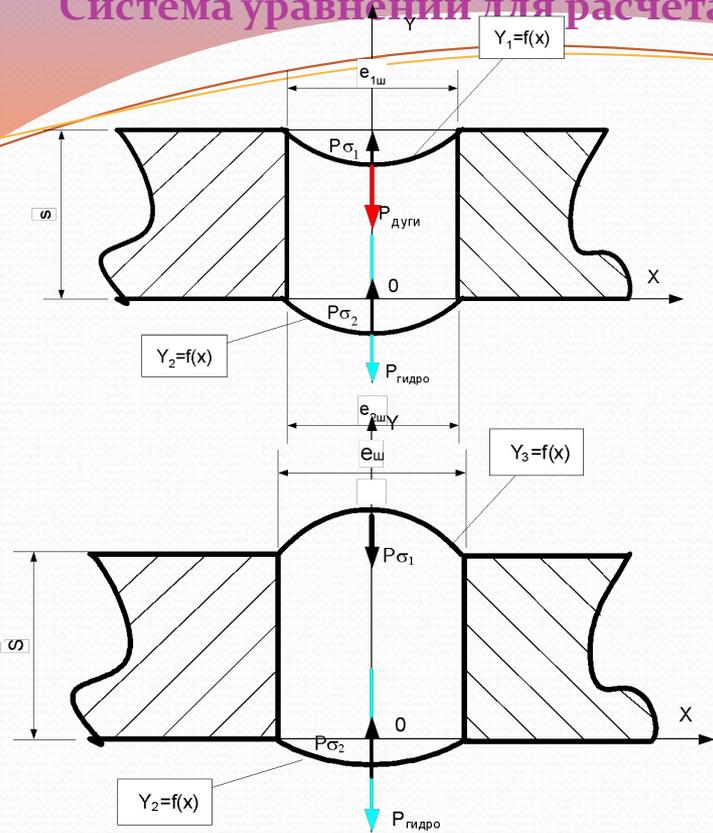
при $x_1=1, x_2=1, x_3=2, x_4=3$ – scheme "plate";

при $x_1=0, x_2=0, x_3=1, x_4=2$ – scheme of "massive body"

The systems of equations for the calculation of welding joints C7, Ni, Ti

Systems of equations	Матричная запись	$A_n = \ a_{ij}\ $	$Y = \ y_j\ $
$F_u = \frac{0,9 \cdot 0,616 \cdot I_{ce}^{1,32} \cdot L_3^{0,38} \cdot d_3^{-0,64}}{3600 \cdot \gamma \cdot V_{ce}}$ $\varphi^2 = \frac{e \cdot \eta_u \cdot I_{ce} \cdot U_\partial \cdot V_{ce}}{32 \cdot \pi \cdot a \cdot \lambda \cdot (T_{ni} - T_0)}$ $h = 0,19 \left(\frac{\eta_u}{\lambda \cdot (T_{ni} - T_0)} \right)^{0,71} \left(\frac{I_{ce} \cdot U_\partial}{d_3} \right)^{0,71} \frac{a}{V_{ce}}$ $U\partial = 3,65 \cdot I_{ce}^{0,37}$ $h_u = A \cdot (\sqrt{F_u})^B$ $\varphi = \frac{L_6}{e_u} = 2,66 \pm 0,23$	$Y = A_4 \cdot X$	$\begin{matrix} 1,32 & 0 & -1 & -0,64 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0,71 & 0,71 & -1 & -0,71 \\ 0,37 & -1 & 0 & 0 \end{matrix}$	$y_1 = \ln(K_F \gamma F_H L_3^{-0,38})$ $y_2 = \ln\left(K_Y \varphi^2 \frac{32\pi a \lambda T}{\eta_u e} \right)$ $y_3 = \ln\left(K_H \left(\frac{\eta_u}{T\lambda} \right)^{-0,71} \frac{h_H}{a} \right)$ $y_4 = -\ln(K_u)$
	$Y = A_3 \cdot X_h$	$\begin{matrix} 0,71 & 0,71 & -1 \\ 0,37 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	$y_1 = \ln\left(K_H \left(\frac{\eta_u}{T\lambda} \right)^{-0,71} \frac{h_H}{a} d_3^{0,71} \right)$ $y_2 = -\ln(K_u)$ $y_3 = \ln\left(K_Y \varphi^2 \frac{32\pi a \lambda T}{\eta_u e} \right)$
	$Y = A_3 \cdot X_{FH}$	$\begin{matrix} 1,32 & 0 & -1 \\ 0,37 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	$y_1 = \ln(K_F \gamma F_H d_3^{0,64} L_3^{-0,38})$ $y_2 = -\ln(K_u)$ $y_3 = \ln\left(K_Y \varphi^2 \frac{32\pi a \lambda T}{\eta_u e} \right)$
	$Y = A_2 \cdot X_h$	$\begin{matrix} 0,71 & -1 \\ -1 & 0 \end{matrix}$	$y_1 = \ln\left(K_H \left(\frac{\eta_u}{T\lambda} \right)^{0,71} \frac{h_H}{a} d_3^{0,71} I_{ce}^{-0,71} \right)$ $y_2 = -\ln(K_u) - 0,37 \ln I_{ce}$

Система уравнений для расчета режима сварки соединений на весу



$$\int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} P_{гидро} dx + \int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} \frac{(P_{см} + P_{дуги}) \cdot e^{kc \cdot x^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy_1(x)}{dx}\right)^2}} dx - \int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} P_{\sigma_1} dx - \int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} P_{\sigma_2} \cdot dx = 0$$

$$\int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} y_1(x) - \int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} y_2(x) = \frac{e_{ш} \cdot s}{2} \quad e_{ш} \cdot s = \frac{1}{\gamma \cdot \Delta H} \cdot \eta_{np} \cdot \frac{I_{св} \cdot U_{\partial}}{V_{св}}$$

$$2 \int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} y_3(x) dx - H \cdot e_{ш} + 2 \int_0^{\frac{e_{ш}}{2}} y_2(x) dx + H \cdot b + = \frac{\alpha_p \cdot I_{св} \cdot \left(1 - \frac{\xi \cdot e^{-7,48 \cdot 10^{-5} \cdot (j-200)^2}}{100}\right)}{\gamma \cdot V_{св}}$$

Требования к свободным поверхностям сварочной ванны

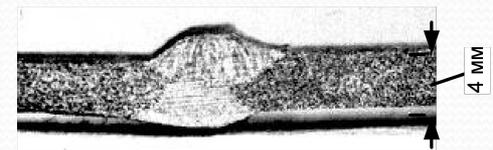
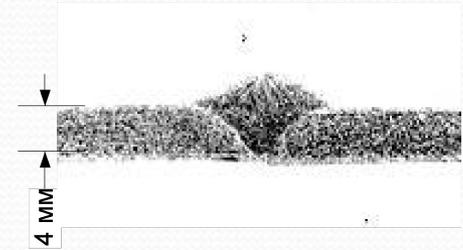
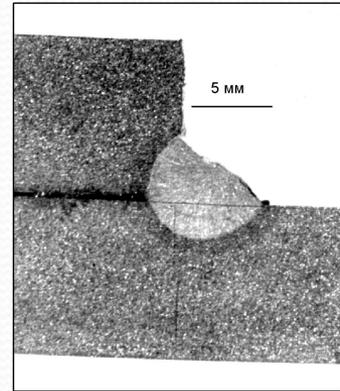
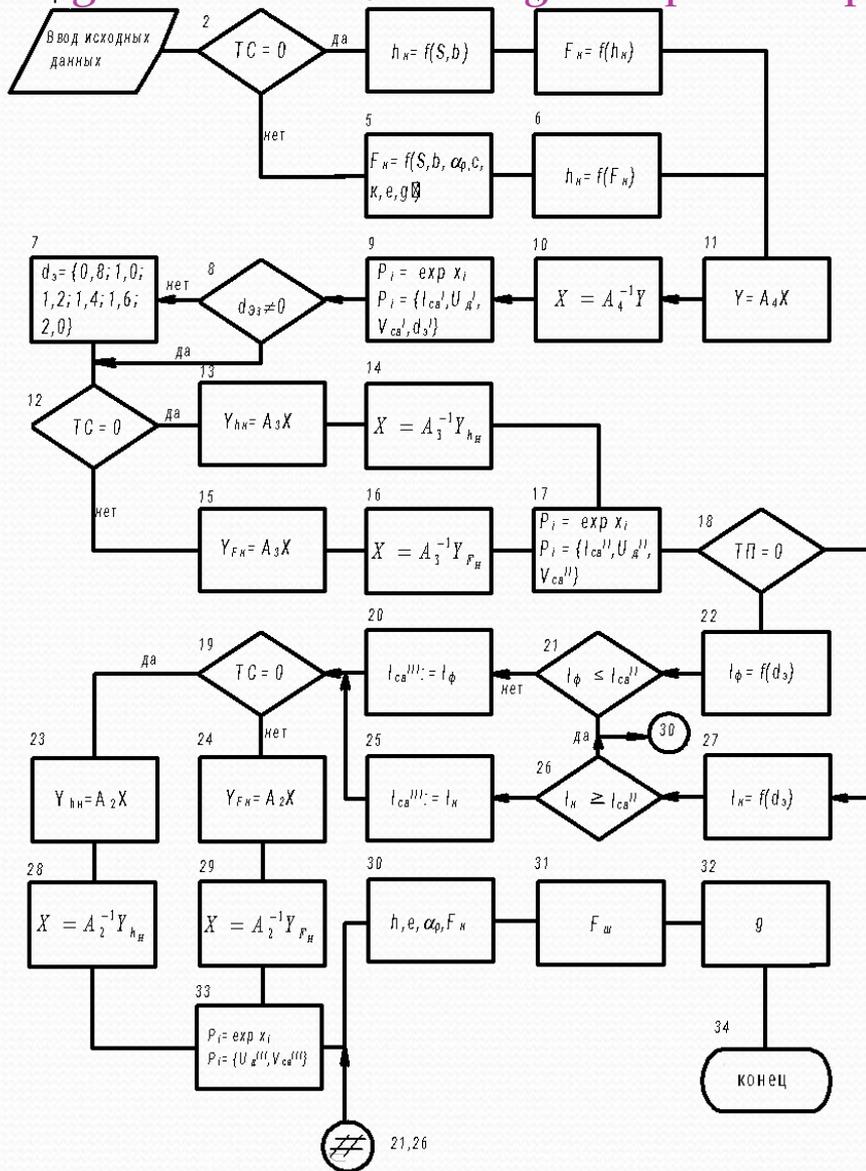
$$y_1\left(\pm \frac{e_{ш}}{2}\right) = 0, \quad y_2\left(\pm \frac{e_{ш}}{2}\right) = 0$$

$$\frac{dy_1(0)}{dx} = 0 \quad \frac{dy_2(0)}{dx} = 0$$

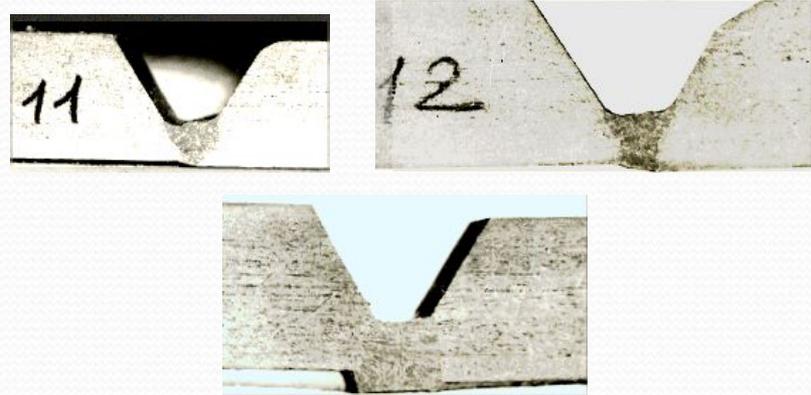
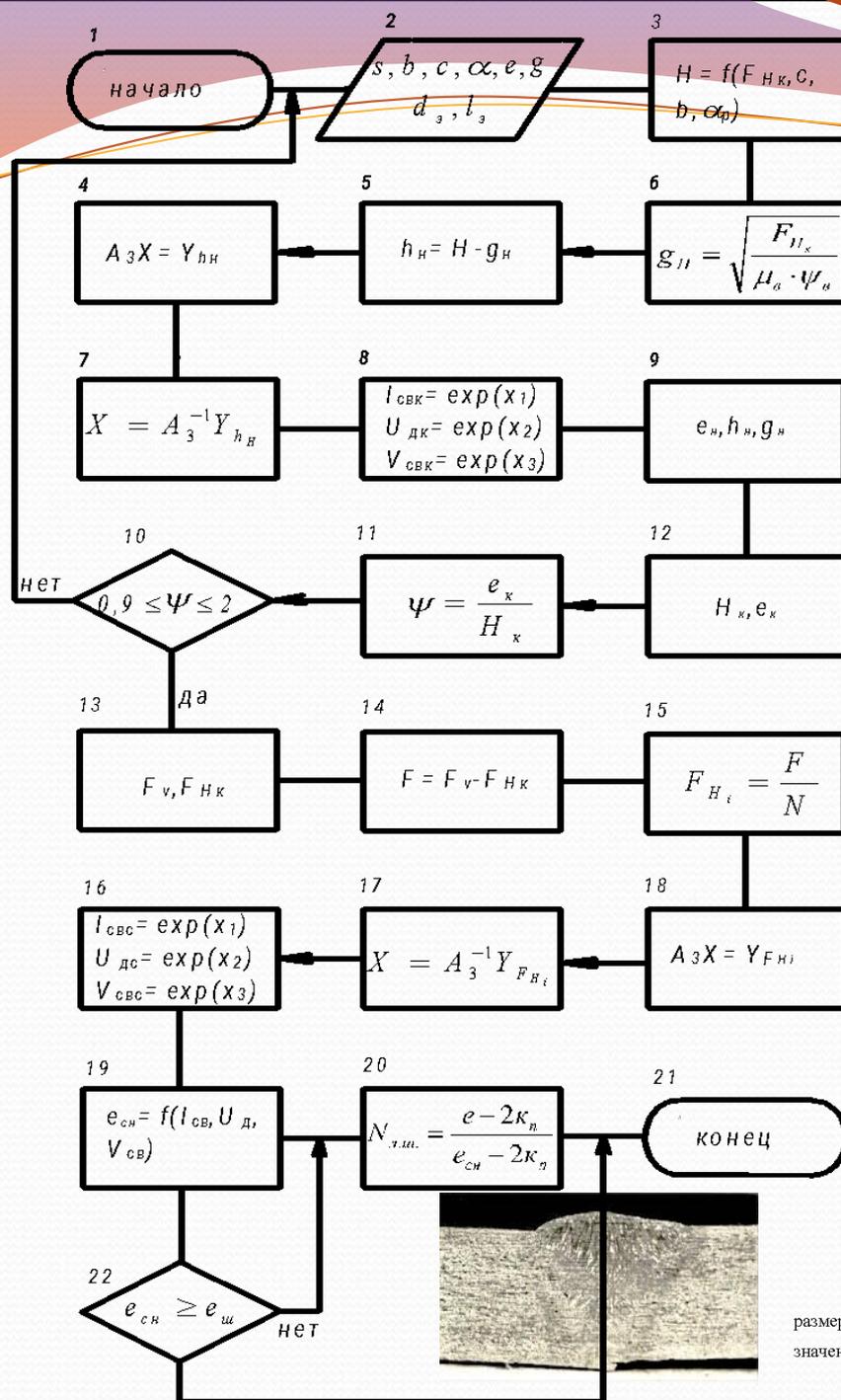
$$I_{св \min} < I_{св} < I_{св \max}$$

$$V_{св \min} < V_{св} < V_{св \max}$$

Algorithm for calculating the optimum parameters of single-pass welding joints



The algorithm for calculating the optimal modes of multipass welding joints



№ соединения	Конструктивные элементы кромок, мм		№ слоя	Параметры режима			
	b	c		I _{св} , А	U _д , В	V _{св} , м/ч	d ₃ , мм
11	1	1	Корневой	129	22	22,7	1,2
	0,9...1,0	0,5...1,0		130...140	22...23	23,4	
3	1	2	Корневой	229	27	19,6	1,6
	1,0...2,0	1,0...2,0		230...240	27...28	20,3	
			229	27	13,7		
			230...240	27...28	13,9		

Критерии оптимальности и размеры контрольных соединений

№	Размеры шва, мм					Критерии оптимальности	
	H _к	e _к	e _ш	g	g ₀	Ψ _{np}	Ψ _ε
11	4,28±0,1 4,6	5,37±0,1 5,52	-	-	-	1,26±0,1 1,2	-
3	-	-	14,1±0,2 14,4	1,66±0,1 (1±1)	0,87±0,25 (1±1)	-	8,7±0,6 (6...10)

Примечания: 1. В числителе приведены экспериментальные значения критериев оптимальности и размеров шва, в знаменателе – расчетные значения соответствующих критериев и размеров, в скобках – значение высоты выпуклости по ГОСТ 14771. 2. g₀ – высота выпуклости с обратной стороны соединения.

Алгоритм расчета оптимального режима сварки закаливающих сталей

За функцию цели принимаем величину объемной доли мартенсита

$T(P, G_n)$ - функция, определяющая температурное поле в свариваемом изделии;
 $f_s(X, T, \tau)$ - функция структурного состава ЗТВ, X – хим. состав свариваемой стали

$$V_M = F(T(P, G_n), f_s(X, T, \tau)) \rightarrow \min$$

при условии, что $F(P) - h = 0$

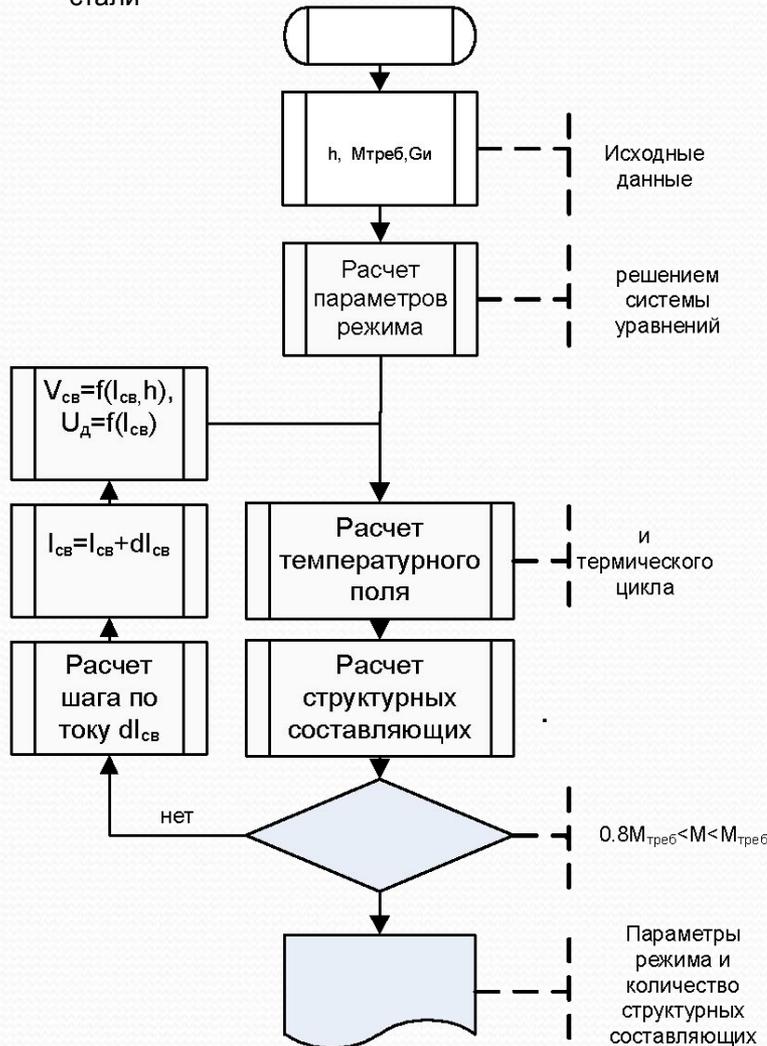
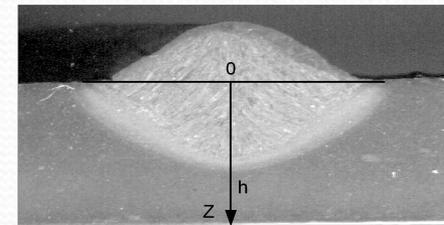
$$U_\delta = f(I_{св})$$

или

$$\sqrt{\frac{\alpha_p I_{св}}{\gamma V_{св}}} - k = 0$$

$$I_{св \min} < I_{св} < I_{св \max}$$

$$V_{св \min} < V_{св} < V_{св \max}$$



Экспериментальное распределение твердости по сечению сварных швов и ЗТВ при наплавке на стали и 40X (слева) 12X1M1Ф (справа) в сравнении с расчетными.

The algorithm of work CAPP

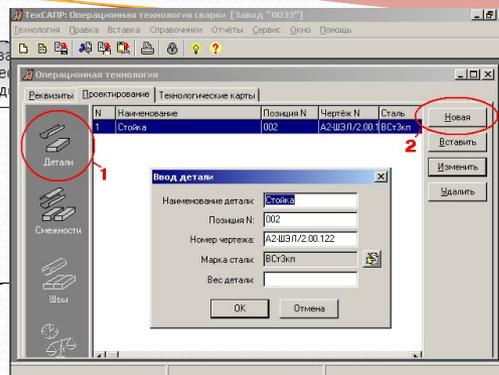
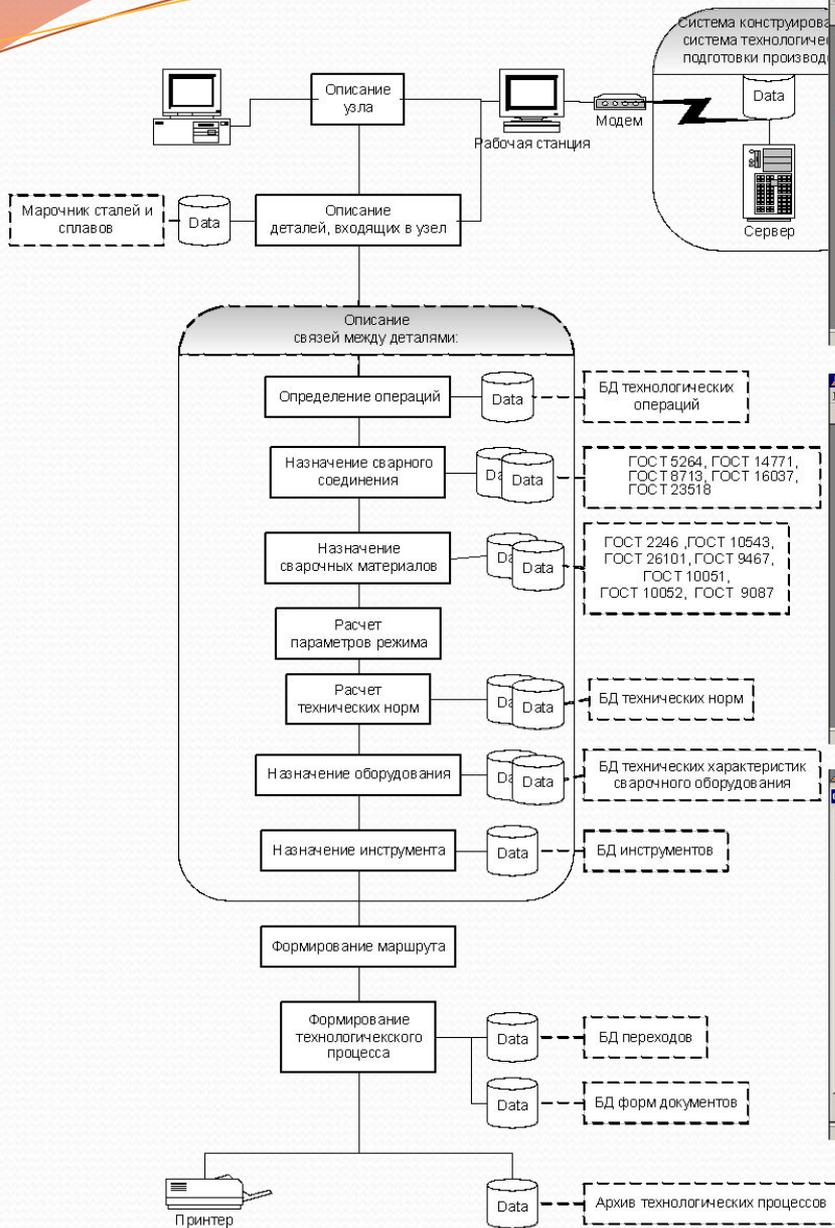
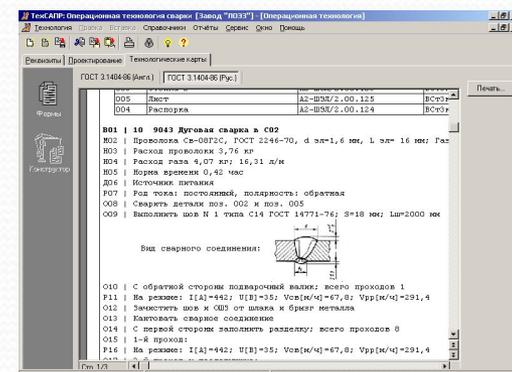
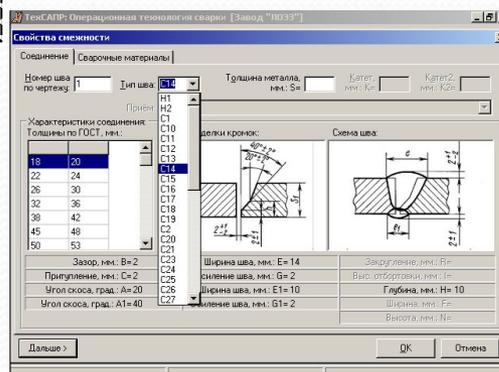
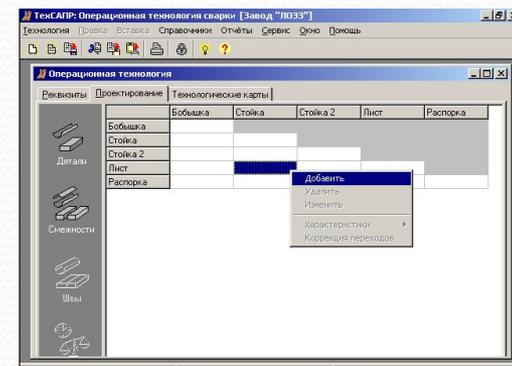
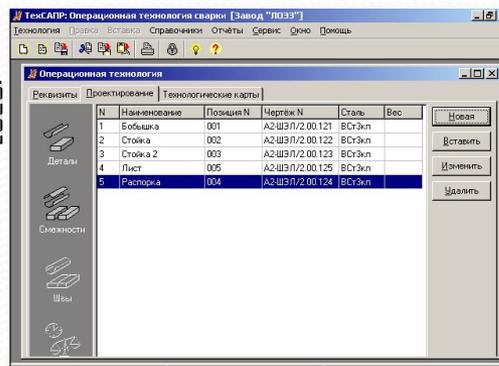


Таблица [STEELUNION]									
Просмотр/редактирование									
Марка стали	SI макс	SI мин	Прочн мин	Прочн макс	Свариваемость	S макс	TEMP	KDV	A
BCCr2л	0,07	0,07	320	410	0	0,05		750	
BCCr2н	0,17	0,05	330	430	0	0,05	750		
BCCr2лн	0,3	0,12	330	430	0	0,05	750		
BCCr3лн	0,15	0,15	370	490	0	0,05	800		
BCCr3л	0,07	0,07	360	460	0	0,05	750		
BCCr3н	0,17	0,05	370	460	0	0,05	750		
BCCr4лн	0,07	0,07	400	510	2	0,05	850		
BCCr4н	0,17	0,05	410	530	2	0,05	800		
BCCr5лн	0,17	0,05	490	630	2	0,05	750		
BCCr5н	0,35	0,15	490	630	2	0,05	750		
BCCr6лн	0,17	0,05	590	590	2	0,05	780		
BCCr6н	0,35	0,15	590	590	2	0,05	850		
Cr0	0	0	300	300	0	0,06	700		
X12	0,4	0,1	0	0	4	0,03	850		
X12M	0,4	0,1	0	0	4	0,03	850		



Экономическое обоснование эффективности применения САПР ТП

Методика	Соединения				Параметры режима					Расчетные величины				Критерии	
	Тип	s	b	k	$I_{св}$	U_0	$V_{св}$	d_3	L_3	α_p	p	K	F_H	k_{np}	k_{cnp}
		мм			A	B	м/ч	мм		$\Gamma \cdot A^{-1} \cdot Ч^{-1}$	$\Gamma \cdot M^{-1}$	мм	мм ²	-	
[1] предлагаемая	Т1	4	0	4	150	22	16	1,2	15	13,5	-	5,7	12,3	1,4	1,8
					136	22	22,5	1,2	10	11,5	-	4,2	8,9		
[1] предлагаемая	Т1	6	0	6	380	35	27	2	30	16,4	-	7,7	29,6	1,3	1,5
					380	33	36,2	2	30	14,4	-	6,2	19,4		
[1] предлагаемая	С7	8	1	-	380	35	18	2	20	14,4	367	-	70,2	1,8	1,8 (1,2)
					380	33	32,9	2	20	14,4	300	-	38,4		
[1] предлагаемая	С17	10	1	-	380	33	16,1	2	20	14,4	306	-	43,6	-	(1,4)
[2]					-	-	-	-	-	-	-	412	-		

Коэффициент
Технологической
производительности

$$k_{np} = \frac{\alpha_H^P \cdot I_{св}^P \cdot F_H^B}{\alpha_H^B \cdot I_{св}^B \cdot F_H^P}$$

Коэффициент
экономии сварочной
проволоки

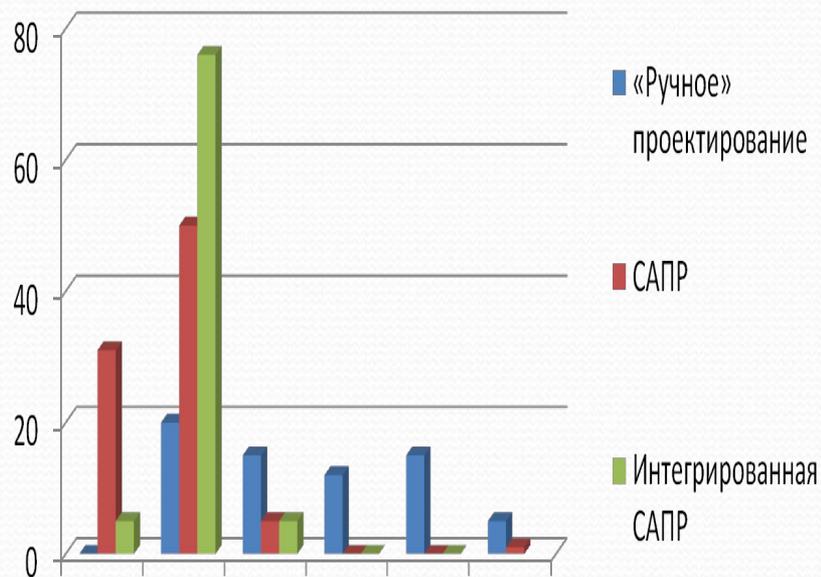
$$k_{cnp} = \frac{\alpha_p^B I_{св}^B \cdot V_{св}^P}{V_{св}^B \cdot \alpha_p^P I_{св}^P}$$

$$\alpha_H = \alpha_p (1 - \psi_H)$$

p - вес наплавленного
металла на 1 м шва

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. /Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Общие производственные нормы расхода материалов в строительстве. Сборник 30. Сварочные работы. /Минмонтажспецстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 56 с

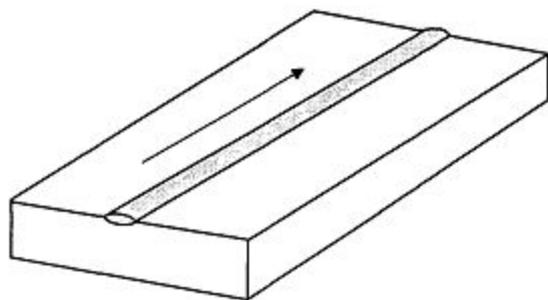
Сравнение баланса времени



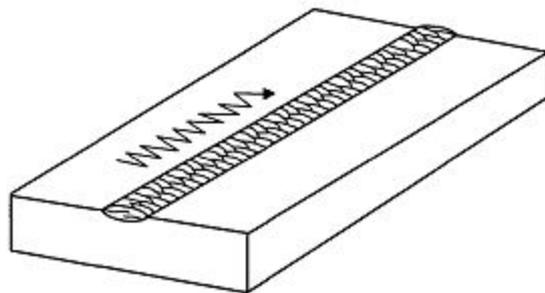
Соотношение затрат времени по задачам разработки МОК

№	Действие	Доля времени, %		
		«Ручное» проектирование	САПР	Интегрированная САПР
1	Ввод исходных данных	-	31	5
2	Анализ конструкции CSE	20	50	76
3	Определение последовательности сборки	15	5	5
4	Определение плана ТП (структурный синтез)	5	5	5
5	Определение переходов каждой операции (параметрический синтез)	10	0	0
6	Определение параметров режима (параметрический синтез)	5	1	1
7	Выбор сварочных материалов	5	5	5
8	Расчет норм расхода сварочных материалов	12	0	0
9	Расчет норм времени	15	0	0
10	Выбор оборудования	1	1	1
11	Выбор оснастки	1	1	1
12	Выбор инструмента	1	1	1
13	Оформление МОК	10	0	0
	Итого	100	100	100

перспективы



(A) STRINGER BEAD



(B) WEAVE BEAD

Примеры применения САПР ТП

ОАО «ЛОЭЗ Гидромаш», г. Липецк



Узлы машин с кузовами специального назначения



Узлы пакетировочных линий



ОАО «Боринское», г. Липецк

- Теплообменники водогрейных котлов серии ИШМА
- сталь 08кп
- толщина 3 мм
- Сварка на весу
- сварка в смеси в смеси 75%CO₂+ 25%Ar
- Источники питания ВДУ-506



Внешний вид шва



Обратный валик шва

Общие выводы и основные результаты работы

1. Установлено, что существенными параметрами процесса формирования сварных швов при сварке в защитных газах в нижнем положении кроме теплофизических свойств свариваемого сплава и свойств источника теплоты, являются свойства плазмы сварочной дуги: ее средняя температура, теплосодержание, теплопроводность и транспортное сечение рассеяния электронов на атомах и молекулах. Получены критерии подобия, содержащие перечисленные существенные параметры, и аналитические выражения с экспериментально определенными коэффициентами, связывающие критерии подобия и позволяющие решать прямую задачу – рассчитывать размеры сварного шва при наплавке и сварке с зазором по заданным параметрам режима, зазору и составу газовой защиты.
2. Экспериментально определены закономерности изменения температуры плазмы сварочной дуги смесей CO_2+O_2 (содержание O_2 до 40%), $\text{Ar}+\text{CO}_2$ (содержание CO_2 до 40%) и $\text{Ar}+\text{O}_2$ (содержание O_2 до 15%). Установлено, что имеет место обратно пропорциональное влияние сечения рассеяния электронов на атомах и молекулах s_{σ} на электронную, а учитывая квазинейтральность низкотемпературной плазмы сварочной дуги, - на среднюю температуру плазмы сварочных дуг, горящих в смесях газов. Величина σ_{s} кислорода, углекислого и угарного газов выше, чем аргона, а σ_{s} кислорода выше, чем углекислого газа, поэтому электронная температура и, следовательно, температура смеси CO_2+O_2 снижается с ростом содержания кислорода, аналогично объясняется снижение температуры смеси $\text{Ar}+\text{CO}_2$ и $\text{Ar}+\text{O}_2$ с ростом содержания CO_2 и O_2 соответственно. Снижение температуры во всех случаях составляет ~40К на каждый объемный процент примеси. При 40% CO_2 в смеси падения температуры плазмы не происходит по сравнению с плазмой смеси $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$.
3. Установлено, что существенными параметрами процесса образования струйного переноса электродного металла при сварке в аргоне являются свойства сплава анода: его поверхностное натяжение в газовой среде, плотность; удельное электрическое сопротивление и скрытая теплота плавления, а также его размеры – диаметр и длина вылета. Получены критерии подобия, содержащие перечисленные существенные параметры, и аналитическое выражение с экспериментально определенными коэффициентами, связывающее критерии подобия и позволяющее рассчитывать силу критического тока для различных материалов электродной проволоки и ее размеров.

- 4. Установлено, что для решения обратной задачи – расчета оптимальных параметров режима дуговой сварки плавлением – необходимы математические модели в виде системы уравнений, отражающих процессы плавления основного и электродного металла и связывающих параметры режима с критериями оптимальности. Состав систем уравнений зависит от типа свариваемого соединения и числа определяемых параметров режима. Разработана методика формирования математических моделей, дающих возможность решения обратной задачи. Получены математические модели, включающие зависимости формирования швов и плавления электрода от параметров режима и позволяющие рассчитывать оптимальные параметры режима сварки сварных соединений ГОСТ 14771 в нижнем положении по заданным критериям оптимальности.
- 5. Установлено, что технологические задачи, возникающие при подготовке производства сварных конструкций, формулируются как математические задачи нелинейного программирования, в которых функция цели и ограничения являются нелинейными относительно параметров режима. За функцию цели принимают какой-либо критерий оптимальности в виде функции многих переменных, среди которых – параметры режима сварки. Остальные критерии оптимальности используют как условия связи. На параметры режима накладывают ограничения в виде неравенств, описывая таким образом допустимую область их изменения. Алгоритм решения основан на методе множителей Лагранжа.
- 6. Разработана методика формирования критериев оптимальности сварных соединений ГОСТ 14771 из углеродистых и низколегированных сталей. Установлено, что качество сварного соединения описывается набором из частных критериев оптимальности (ЧКО), комплексных критериев оптимальности (ККО), а также дополнительными частными критериями – содержанием мартенситных структур в ЗТВ и потерь электродного металла на разбрызгивание. Частные критерии оптимальности такие, как глубина проплавления, ширина шва, высота усиления и ККО перекрытия корня шва позволяют оценить по заданным параметрам режима вероятность таких дефектов, как непровары и прожоги, а также определить величину отклонения от стандартных размеров сварного шва. Комплексные критерии оптимальности (коэффициенты формы проплавления, формы выпуклости) позволяют оптимизировать форму проплавления, снизив вероятность образования горячих трещин, а также снизить концентрацию напряжений в месте перехода основного металла к выпуклости. Дополнительный частный критерий оптимальности – содержание мартенсита в структуре – дает возможность снизить склонность сварного соединения к холодным трещинам. Дополнительный критерий оптимальности – коэффициент потерь электродного металла на разбрызгивание при сварке с использованием тиристорных источников питания позволяет снизить потери электродного металла путем выбора области сварочных токов с минимальными заданными потерями.

- 7. Разработан метод прогнозирования структуры ЗТВ при сварке однопроходных соединений, базирующийся на полученных в работе аналитических выражениях, определяющих скорость образования центров новой фазы и скорость движения межфазной границы с коэффициентами, определяемыми по диаграммам распада аустенита. Установлено, что точность расчета термического цикла в ЗТВ при дуговой сварке плавлением повышается путем учета выделения теплоты жидким металлом сварочной ванны и кристаллизующимся металлом, прилегающим к хвостовой части сварочной ванны, ранее полученной ими от сварочной дуги.
- 8. Анализом экспериментально полученных зависимостей между критериями подобия Хартмана и давления дуги установлено, что магнитное поле сварочного тока существенно влияет на устойчивость движения жидкого металла сварочной ванны. Показано, что энергия магнитного поля в случае образования несплавлений и подрезов не превышает, а при качественном формировании превышает кинетическую энергию движущегося потока металла. Область образования дефектов формирования шва типа подрезы и несплавления швов независимо от способа сварки и параметров режима описывается функцией критериев Хартмана и Кристенсена. Получено аналитическое описание распределения напряженности магнитного поля в свариваемом изделии и формула для расчетного определения параметров режима сварки, обеспечивающих качественное формирование сварных швов в форсированной области.
- 9. Разработаны методики расчета оптимальных параметров режима сварки соединений с подготовкой кромок по ГОСТ 14771-76, основанные на математических моделях в виде систем уравнений и функции цели, включающей критерии оптимальности, которые определяют качество сварного соединения. Алгоритм реализует итерационный метод поиска оптимума функции цели, за которую принят комплекс критериев оптимальности.
- 10. Разработана методика расчета оптимальных параметров режима сварки углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающих минимальное содержание закалочных структур в ЗТВ при соответствии размеров шва требуемым. Алгоритм реализует итерационный метод поиска оптимума функции цели, за которую принято допустимое содержание мартенситных структур в зоне термического влияния. Уравнением связи используют заданные размеры шва, например глубину проплавления, как функцию параметров режима.

- п. Разработано математическое и информационное обеспечение систем автоматизированного проектирования технологии. Разработаны алгоритмы структурного синтеза – определения состава и последовательности технологических операций и эмпирические правила, основанные на анализе свойств графов сварных деталей машин и пригодные для автоматизированного проектирования последовательности сборки и сварки деталей машин. Разработанные структура, алгоритмы реализованы в системах автоматизированного проектирования технологии сварки, в которые включены модули параметрического синтеза, анализа и оптимизации, а также структурного синтеза. Разработанные системы автоматизированного проектирования технологии сварки внедрены и используются при технологической подготовке сварочного производства, а также в учебном процессе при подготовке инженеров и магистров.
-

- 1. Установлено, что для процесса плавления при сварке в защитных газах существенными параметрами являются свойства плазмы сварочной дуги. Разработаны критерии подобия, учитывающие физические характеристики процесса плавления основного и электродного металла и связывающие теплофизические свойства металлов, плазмы сварочной дуги, размеры электрода, параметры режима и получены зависимости между критериями подобия, позволяющие расчетным путем определять: размеры сварного шва при сварке с зазором, а также при наплавке, область параметров режима без образования подрезов и несплавлений, величину силы критического тока струйного переноса электродного металла.
- 2. Установлено, что для расчета оптимальных параметров режима по заданным критериям оптимальности (решения обратной задачи) необходимы математические модели в виде систем уравнений и функции цели, включающей критерии оптимальности, которые определяют качество соединения. Разработанные системы уравнений включают зависимости, полученные методами теории подобия и математической статистики и связывающие характеристики плавления основного, электродного металлов, параметры режима, теплофизические свойства свариваемых материалов и применяемых защитных газов. Выявлено, что оптимизационные задачи сварочной технологии являются математическими задачами нелинейного программирования и их решение может быть выполнено методом множителей Лагранжа в случае свертки критериев оптимальности или итерационными методами в противном случае. Разработанные методики расчета оптимальных параметров режима, включающие полученные математические модели и критерии оптимальности, дают возможность решать обратную задачу.
- 3. В результате экспериментальных исследований установлены закономерности изменения средней температуры плазмы дуги в смесях $Ag+O_2$, $Ag+CO_2$ и CO_2+O_2 с плавящимся электродом. Температура плазмы смеси $Ag+O_2$ при увеличении содержания O_2 от 0 до 15% падает от $8300 \pm 500K$ (температура аргоновой плазмы дуги Ag) до $7600 \pm 300K$. Температура плазмы смеси CO_2+O_2 при увеличении содержания O_2 от 0 до 40% снижается от $9000 \pm 200K$ (температура плазмы дуги в CO_2) до $7700 \pm 500K$. Температура плазмы смеси $Ag+CO_2$ при изменении содержания CO_2 от 0% до 40% сначала падает от $8300 \pm 500K$ до $7400 \pm 300K$ при 15...20% CO_2 в смеси, затем возрастает, достигая $7700 \pm 500K$ при 40% CO_2 . Выявлено, что снижение температуры плазмы смеси происходит примерно на 40K при увеличении содержания примеси CO_2 или O_2 в смеси на один процент, что позволяет точно определять температуру сварочной плазмы в зависимости от ее состава.

- 4. Анализом магнито-гидродинамических процессов в сварочной ванне с использованием теории подобия установлено, что магнитное поле сварочного тока существенно влияет на устойчивость движения жидкого металла сварочной ванны: энергия магнитного поля сварочного тока в случае образования несплавлений и подрезов не превышает, а при качественном формировании превышает кинетическую энергию движущегося потока металла. На основе аналитического описания распределения напряженности магнитного поля в свариваемом изделии и обработки экспериментальных данных получена зависимость между критериями подобия, позволяющая расчетным путем определять параметры режима сварки, обеспечивающие формирование сварных швов без образования подрезов.
- 5. На основе расчетно-экспериментального описания процессов структурных превращений и температурного поля, создаваемого сварочной дугой, ванной жидкого металла и металлом шва, разработана методика расчета оптимальных параметров режима сварки углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающих минимальное содержание закалочных структур в ЗТВ при соответствии размеров шва требуемым.
- 6. Используя методы дискретной математики, разработаны методики построения технологических маршрутов изготовления сварных конструкций. На основе анализа графовых моделей сварных конструкций разработаны эмпирические правила и алгоритмы, позволяющие определять варианты сборки деталей машин.

Примеры объектов исследований ОАО «ЛОЭЗ Гидромаш», г. Липецк



Сборочно-сварочные единицы ЛИНИИ ПАКЕТИРОВАНИЯ ТБО

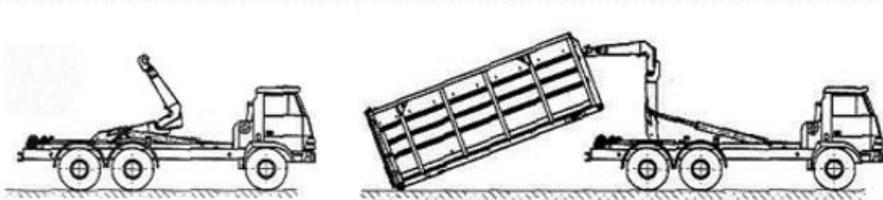
- Марки сталей Вст3, Вст5, сталь 30, 09Г2С, 10ХСНД
- Толщины 10...25 мм
- Подготовка кромок по ГОСТ 14771
- Защитный газ: CO_2
- Источники питания : ВДУ-506



Примеры объектов исследований

ОАО «ЛОЭЗ Гидромаш»,
г. Липецк

сборочно-сварочные единицы
мультилифта крюкового типа для
перевозки контейнеров
сталь 10ХСНД,
толщина 10 мм,
сварка в углекислом газе



ОАО «Боринское»,
г. Липецк

- Теплообменники водогрейных котлов серии ИШМА
- сталь 08кп
- толщина 3 мм
- Сварка на весу
- Варианты сварки:
 - в углекислом газе,
 - в смеси $75\%CO_2 + 25\%Ar$
- Источники питания ВДУ-506

Применение алгоритма определения технологического маршрута

Дано множество операций: - транспортная (0401), - комплектование (0418), - сборка (8800), - сварка контактная точечная (9011), - сварка дуговая в углекислом газе (9051), - зачистка (0109), - контроль (02).	Заданы некоторые из бинарных отношений: 8800 < 9011, 9051 9051 < 0109 0401 < 0418, 8800, 9011, 9051, 0109, 02 9011 >> 9051 0418 < 8800
--	---

Матрица *достижимости* (предшествования) S для множества {0401, 0418, 8800, 9011, 9051, 0109, 02}

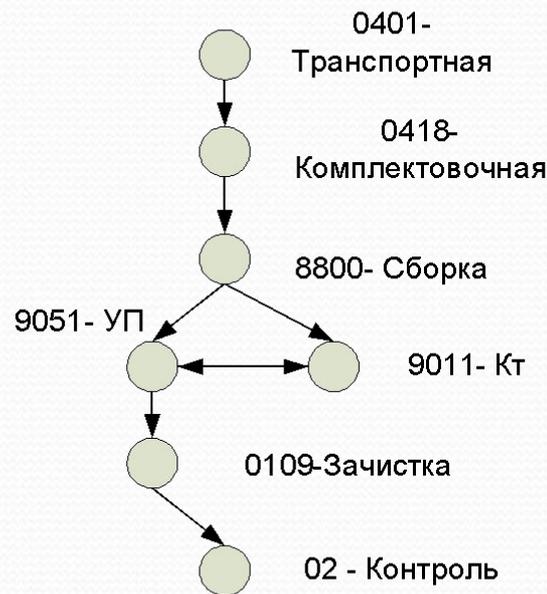
$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Тогда матрица следования для {9011, 9051, 0109, 8800, 0418} будет иметь вид

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрицы путей не более 2, 3 и 4, соответственно, имеют вид

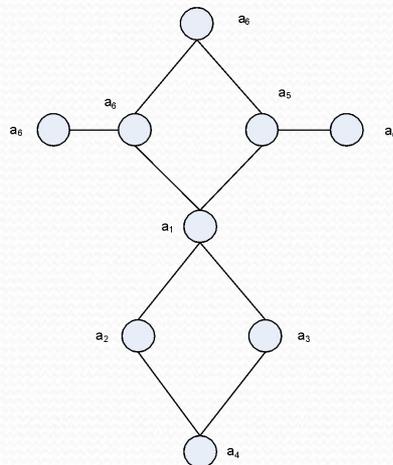
$$A^{[2]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A^{[3]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A^{[4]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



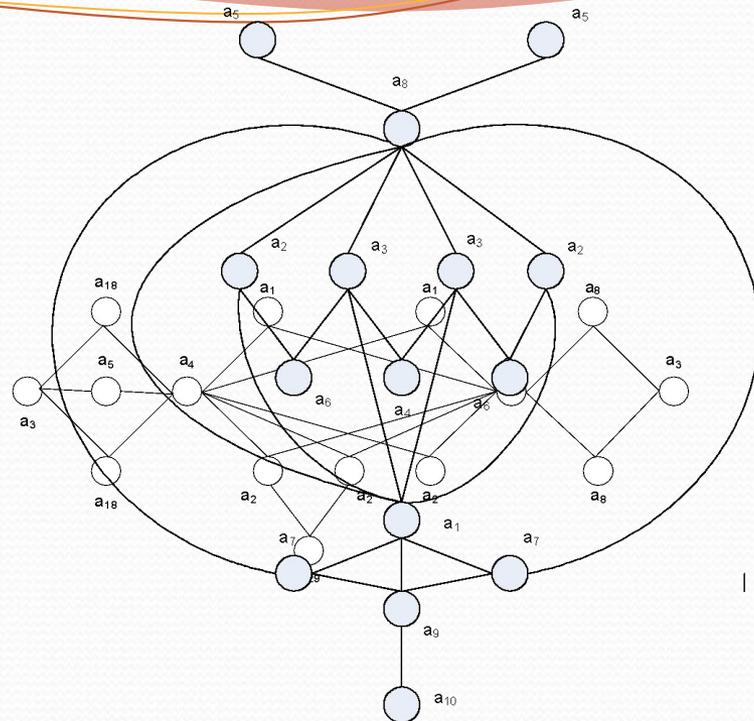
Модели сварных конструкций и разработка алгоритма определения последовательности сборки

Правила

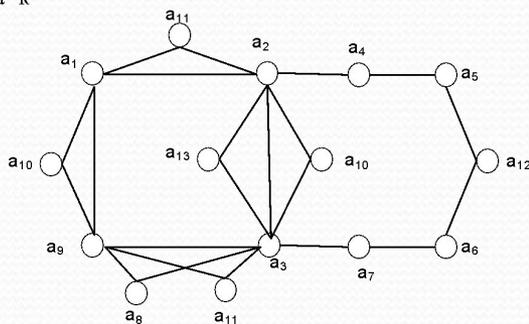
1. Деталь, входящая в ССЕ, принимается за базу сборки, если вершина графа, ее представляющая, имеет максимальную локальную степень $\rho(a)$.
2. Если граф какой-либо ССЕ однороден степени n , то за базу сборки принимаются все детали, входящие в ССЕ, если нет специфических требований или условий. Это означает, что нет петлевой сборки.
3. Если в графе какой-либо ССЕ имеются несколько вершин с примерно равными максимальными среди остальных локальными степенями $\rho(a)$, то они все могут быть приняты за базы сборки. Таким образом, образуется петлевая сборка.
4. Если большинство вершин, замещающих детали ССЕ, имеет локальную степень $\rho(a)=2$, то ССЕ собирается и сваривается в одном приспособлении.
5. Деталь, идентифицируемая на графе своей вершиной как лист, должна быть приварена к базе последней.
6. Деталь, имеющая петлю, сваривается первой.



Граф боковины пресса



Граф балки пресса



Граф каркаса кабины трактора ЛТЗ-40

Граф рамы

Общие выводы и основные результаты работы

- 1. Разработана структура и методика формирования математических моделей, пригодных для решения обратной задачи технологии – расчета оптимальных параметров режима сварки по заданным свойствам сварного соединения. Методика состоит в создании систем уравнений, связывающих параметры режима сварки и критерии оптимальности и отражающих как проплавление основного металла и формирование шва и ЗТВ, так и процессы плавления и переноса электродного металла. Необходимые уравнения получают методами теории подобия, что позволяет учесть физические особенности моделируемого процесса сварки.
- 2. Созданы расчетные методики разработки оптимальной технологии, включающие критерии оптимальности, основанные на геометрических, отражающих технологические свойства, и структурных показателях качества сварного соединения, математические модели и алгоритмы расчета параметров режима сварки различных типов сварных соединений, определения маршрута изготовления сварных конструкций, определения последовательности сборки.
- 3. Установлено, что технологические задачи, возникающие при подготовке производства сварных конструкций, формулируются как математические задачи нелинейного программирования, в которых функция цели и ограничения являются нелинейными относительно параметров режима. За функцию цели принимают какой-либо критерий оптимальности в виде функции многих переменных, среди которых – параметры режима сварки. Остальные критерии оптимальности используют как условия связи. На параметры режима накладывают ограничения в виде неравенств, описывая таким образом допустимую область их изменения.
- 4. Сделана общая постановка задачи автоматизированного проектирования технологии сварки, сформулированная на основе анализа зависимости критериев оптимальности сварного шва и зоны термического влияния от параметров режима сварки в допустимой их области. Постановка задачи: найти экстремум функции качества в ограниченной области изменения управляемых параметров. При этом решается обратная задача – определение параметров режима сварки по заданным критериям оптимальности сварной конструкции.
- 5. Сформулированы теоретико-графовые модели технологического маршрута изготовления сварных конструкций и последовательности их сборки-сварки; показана сводимость технологических задач к задачам на графах. Разработаны алгоритмы, реализующие синтез технологических маршрутов и последовательность сборки-сварки..
- 6. Проведены экспериментально-аналитические исследования плавления электродной проволоки, в результате которых установлено следующее.
- Спектрографическими методами исследования плазмы сварочной дуги при наплавке проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм установлено, что при токах 130...140 А температура плазмы промышленной сварочной дуги, образованной диоксидом углерода со стальными плавящимися электродами диаметром 1,2 мм, составляет 9000 ± 200 К. Температура плазмы дуги, образованной аргоном, при тех же условиях имеет температуру 8300 ± 500 К.
- Добавляемые к аргону диоксид углерода (до 20%) и кислород (до 15%), снижают температуру плазмы сварочной дуги. Добавка кислорода к диоксиду углерода также снижает температуру плазмы. Снижение температуры во всех случаях составляет ~40 К на каждый объемный процент примеси. При 40%CO₂ в смеси падения температуры плазмы не происходит по сравнению с плазмой смеси Ar+20%CO₂.

- Получены КП, связывающие силу критического тока струйного переноса $I_{кр}$ в Аг, свойства электрода-анода (плотность, температуру плавления, удельное электрическое сопротивление ρ , теплоту плавления, поверхностное натяжения); его размеры (L_3 и d_3). Аналитически получено критериальное выражение для расчета $I_{кр}$ при сварке проволоками различного химического состава, в том числе Св-06Х18Н9Т, Св-АМц и Св-08Г2С.
- 7. Методами теории подобия и размерности в результате экспериментально-аналитических исследований плавления основного металла определены критерии подобия, связывающие размеры шва, теплофизические свойства металла, параметры режима, напряженность магнитного поля сварочного тока и установлено следующее.
- Размеры сварного шва в защитных газах определяются функцией параметров режима, описываемыми критерием π_{23} , и свойств плазмы сварочной дуги, представленных полученным в работе критерием π_{11} . Получены критериальные выражения для расчета размеров сварного шва при наплавке и сварке с зазором.
- 8. Анализом экспериментально полученных зависимостей между критериями подобия установлено, что магнитное поле сварочного тока существенно влияет на устойчивость движения жидкого металла сварочной ванны. Показано, что энергия магнитного поля в случае образования несплавлений и подрезов не более, а при качественном формировании она превышает кинетическую энергию движущегося потока металла. Область образования дефектов формирования шва типа подрезы и несплавления швов независимо от способа сварки и параметров режима описывается функцией критериев Хартмана и Кристенсена.
- Аналитически решена задача расчета распределения напряженности магнитного поля сварочного тока в изделии на основе вычисления взаимодействия потенциалов, приписываемых сварочной дуге и токоподводу при постоянном электрическом токе.
- 9. Разработаны аналитические выражения для расчета структурных составляющих стали под действием сварочного термического цикла. Показано, что точность расчета тепловых полей в ЗТВ повышается путем учета выделения теплоты жидким металлом сварочной ванны и кристаллизующимся металлом, прилегающим к хвостовой части сварочной ванны, ранее полученной ими от сварочной дуги. Разработан алгоритм расчета режима сварки сталей, склонных к закалке. Алгоритм реализует итерационный метод поиска оптимума функции цели, за которую принято допустимое содержание мартенситных структур в зоне термического влияния. Уравнением связи используют заданные размеры шва, например глубину проплавления. Исходными данными являются химический состав стали и первое приближение режима. Управляемые параметры – параметры режима сварки – изменяются в допустимой области.
- 10. Разработана методика расчета параметров режима сварки соединений на весу. Математическая модель в двумерной постановке включает в себя интегральные уравнения, описывающие статическое равновесие шва, уравнение теплового состояния. При решении прямой задачи технологии принимается, что параметры режима заданы и определяется форма выпуклости шва. В случае решения обратной задачи принимается форма выпуклости шва, параметры режима рассчитываются в допустимой области.

- п. Разработано математическое и информационное обеспечение систем автоматизированного проектирования технологии.
- Разработаны структура, алгоритм и системы автоматизированного проектирования технологии сварки. В САПР ТП включены модули параметрического синтеза, анализа и оптимизации, а также структурного синтеза. Разработанные системы автоматизированного проектирования технологии сварки внедрены и используются при технологической подготовке сварочного производства, а также в учебном процессе при подготовке инженеров сварочного производства.

- 1. Разработаны структура математических моделей и методики расчета оптимальных параметров режима сварки, включающие физико-математические модели в виде систем уравнений и функцию цели, содержащей критерии оптимальности. Система уравнений состоит из экспериментально-статистических зависимостей, связывающих характеристики плавления основного и электродного металлов, параметры режимов и теплофизические свойства свариваемых материалов и применяемых защитных газов. Для расчета режимов сварки соединений на весу с полным проплавлением и коневого прохода соединений с разделкой кромок, разработаны математические модели в виде системы дифференциальных и интегральных уравнений, описывающих равновесие сварочной ванны в силовом поле и ее тепловое состояние в двумерной постановке при задании формы проплавления и выпуклости шва.
- 2. Определены критерии подобия и их выражения, связывающие теплофизические свойства металлов, защитных газов, размеры электрода, параметры режима, параметры сварочной электрической цепи и позволяющие расчетным путем определять
 - размеры сварного шва при наплавке,
 - размеры сварного шва при сварке с зазором.
 - величину тока струйного переноса электродного металла,
- 3. На основе обработки экспериментальных данных методами теории подобия получена критериальная зависимость, описывающая область допустимых параметров режима сварки без образования подрезов.
- 4. На основе расчетно-экспериментального описания процессов структурных превращений и температурного поля, создаваемого сварочной дугой, ванной жидкого металла и металлом шва, разработана методика расчет и условной оптимизации параметров режима сварки закаливающихся сталей.
- 5. Разработаны алгоритмы построения технологических маршрутов изготовления сварных конструкций. На основе анализа графовых моделей сварных конструкций разработаны алгоритмические правила определения последовательности их сборки.
- 6. В результате экспериментальных исследований установлены закономерности изменения температуры в смесях $Ar+O_2$, $Ar+CO_2$ и CO_2+O_2 с плавящимся электродом. Температура плазмы смеси $Ar+O_2$ при увеличении содержания O_2 от 0 до 15% падает от 8300 ± 500 К (температура аргоновой плазмы дуги Ar) до 7600 ± 300 К. Температура плазмы смеси CO_2+O_2 при увеличении содержания O_2 от 0 до 40% снижается от 9000 ± 200 К (температура плазмы дуги в CO_2) до 7700 ± 500 К. Температура плазмы смеси $Ar+CO_2$ при изменении содержания CO_2 от 0% до 40% сначала падает от 8300 ± 500 К до 7400 ± 300 К при 15...20% CO_2 в смеси, затем возрастает, достигая 7700 ± 500 К при 40% CO_2 . Снижение температуры плазмы смеси происходит примерно на 40 К при увеличении содержания примеси в смеси на один процент.