



# ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

(Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» // В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.;  
Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. Шк., 1988. – 559 с.)

**Автор: д. т. н. Лузан С.О.**

**Лекция 13. Тепловые процессы при  
электрошлаковой и контактной  
сварках**

**(тема «Нагрев и плавление металла при  
сварке»)**

**План лекции**

- 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке**
- 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке  
с применением давления**

# 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке

Одна из наиболее характерных особенностей тепловых процессов при **электрошлаковой сварке** – значительная распределенность источника теплоты. Основной металл подогревается шлаком на довольно значительной длине, составляющей около 30...70 мм.

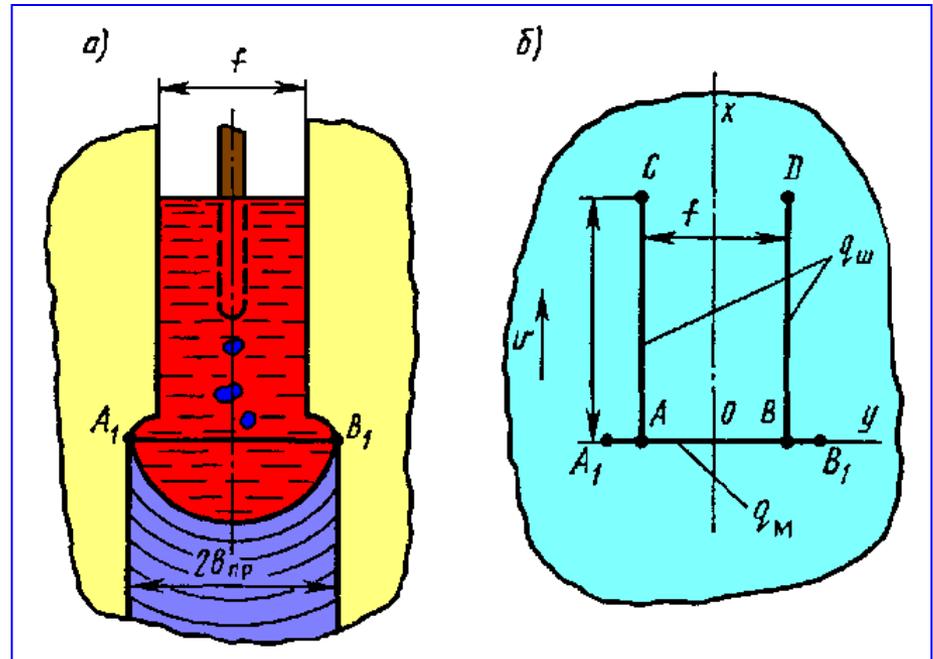


Рис. 1 – Схема нагрева металла при электрошлаковой сварке:  
 а – схема процесса;  
 б – схема движения шлаковых  $q_{ш}$  и металлического  $q_M$  источников теплоты

# 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке

## На заключительной стадии нагрева

кромки основного металла разогреваются активной зоной шлаковой ванны и опускающимся расплавленным электродным металлом, в результате чего образуется металлическая ванна шириной, **равной ширине шва  $2b_{гр}$**  (рис. 1, а).

В простейших инженерных схемах расчета воспроизвести сложную пространственную форму выделения теплоты при электрошлаковой сварке не представляется возможным.

**Хорошо отвечает фактическому распределению температур и форме проплавления следующая расчетная схема источника теплоты (рис. 1, б)**

# 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке

В сплошной пластине без сварочного зазора  $f$  движутся три (равномерных по толщине металла) источника теплоты в виде линий  $AC$ ,  $BD$ , расстояние между которыми равно  $f$  и  $A_1B_1$ . Мощность источника на линии  $A_1B_1$  соответствует количеству теплоты, приносимому расплавленным электродным металлом в секунду:

$$q_m = v f \delta \rho h_{пл}$$

(1)

где  $v$  – скорость сварки;  
 $f$  и  $\delta$  – зазор и толщина металла;  
 $\rho$  – плотность;  
 $h_{пл}$  – теплосодержание в единице массы металла, если его определять от  $T_n$  до температуры шлаковой ванны в ее активной зоне.

# 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке

Мощность  $q_{ш}$  двух источников  $AC$  и  $BO$  равна разности между всей эффективной мощностью источника  $q$  и мощностью так называемого металлического источника  $q_M$ :

$$q_{ш} = q - q_M \quad (2)$$

Теплота, выделяемая по линиям  $AC$  и  $BD$  и распространяющаяся влево от  $AC$  и вправо от  $BD$ , соответствует подогреву кромок пластин шлаковой ванны.

Теплота, распространяющаяся вправо от  $AC$  и влево от  $BD$ , вследствие ухода источников вперед в основном создает тепловой поток через сечение  $A_1B_1$ , что соответствует подогреву металла ванны со стороны **шлака**, который имеет более высокую температуру, чем расплавленный металл в ванне.

# 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке

Линейная интенсивность мощности равна  $q_m/(2b_{пр})$  у металлического и  $q_{ш}/(2h_{ш})$  у шлакового источников теплоты. Такой нагрев предопределяет характер распределения температур в пластинах. Изотермы подходят к свариваемым кромкам под некоторым углом, отличающимся от  $90^\circ$  (рис. 2), нагрев кромок происходит задолго до их плавления.

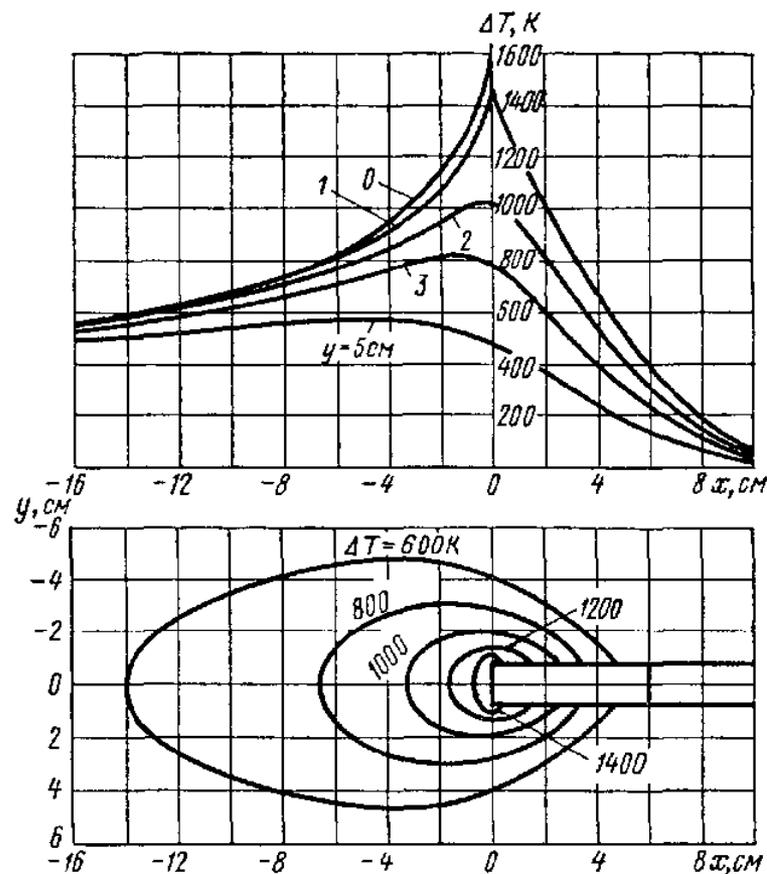


Рис.2 – Температурное поле предельного состояния при электрошлаковой сварке, рассчитанное по схеме двух шлаковых и одного металлического источников теплоты ( $\delta=10$  см,  $f=2$  см,  $h_{ш}=6$  см,  $q_{ш}=10$  кВт)

# 1. Тепловые процессы при электрошлаковой сварке

Приращение температуры в любой точке может быть подсчитано с использованием выражения

$$\Delta T = \frac{q_w e^{-\nu x/(2a)}}{4\pi\lambda\delta b_{np}} \int_{(y-b_{np})}^{(y+b_{np})} K_0\left(\frac{\nu\beta}{2a} \sqrt{x^2 + y^2}\right) dy +$$

$$+ \frac{q_w}{4\pi\lambda\delta h_w} \int_{(x-h_w)}^x e^{-\nu x/(2a)} \left\{ K_0\left[\frac{\nu\beta}{2a} \sqrt{x^2 + (y-b_{np})^2}\right] + \right.$$

$$\left. + K_0\left[\frac{\nu\beta}{2a} \sqrt{x^2 + (y+b_{np})^2}\right] \right\} dx \quad (3)$$

где  $\beta = \sqrt{1 + 4ba/\nu^2}$ ;  $b = 2a/(\text{ср}\delta)$ ;  $x, y$  – координаты точки, в которой определяется приращение температуры.

Начало движущейся системы координат для уравнения (3) находится в точке  $O$  (см. рис. 1, б).

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

### 2.1. Контактная сварка стержней встык

Нагрев стержней при контактной сварке встык осуществляется проходящим током плотностью  $j$ , который совершает работу при удельном сопротивлении металла  $\rho_r$  и контактном сопротивлении  $R$  на границе между стержнями (рис. 1)

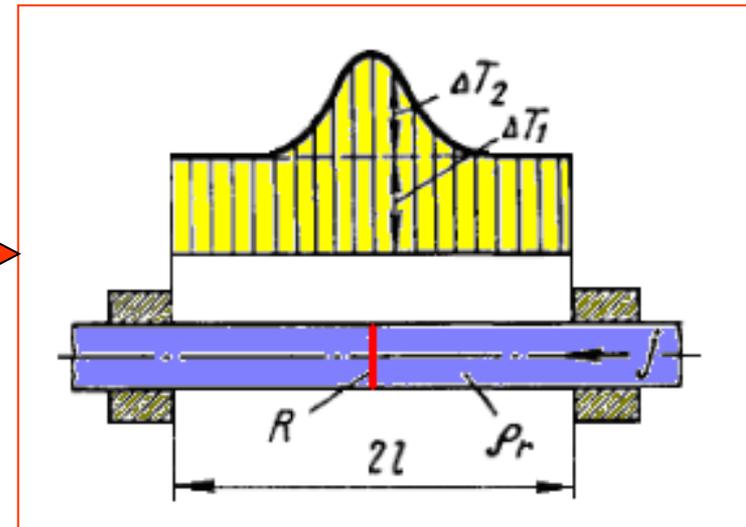


Рис. 1 - Распределение приращений температуры по длине свариваемых стержней в процессе их нагрева током

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

В общем случае из-за наличия контактного сопротивления распределение температуры по длине стержня неравномерно.

Приращение температуры  $\Delta T$  можно формально представить как сумму (1):

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (1)$$

где  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  - соответственно равномерная и неравномерная составляющие приращения температуры  $\Delta T$ .

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

Приняв для расчета схему неограниченного стержня без теплоотдачи в воздух, приращение температуры  $\Delta T$  можно рассчитать (2)

$$\Delta T_1 = (e^{\beta \omega_0 t} - 1) / \beta \quad (2)$$

где -  $\omega_0 = [\rho_r / (c\rho)]273j^2$  начальная скорость нагрева; t- время

Значения  $\omega_0 = [\rho_r / (c\rho)]273j^2$  и коэффициента  $\beta$ , используемые для расчета нагрева стержней при контактной сварке, приведены в табл. 1



## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

Таблица 1 – Численные значения коэффициентов, используемых для расчета нагрева стержней при контактной сварке

Материал	$[\rho c / (c\rho)]_{\text{ст}} \cdot 10^4$ , см <sup>4</sup> ·К (А <sup>2</sup> ·с)	$\beta \cdot 10^3$ , 1/К	$j^2 t_{\mu} \cdot 10^{-6}$ , А <sup>2</sup> ·с/см <sup>4</sup>	$k \cdot 10^{-6}$ , Дж/(А·см <sup>4</sup> )
Сталь 10	3,6	3,8	93...89	0,8...1
Сталь 45	5,25	3,0	75...72	0,7...0,9
Сталь 25Н3	5,6	2,23	78...75	0,9...1
Сталь инструментальная (0,1% С; 0,58% Мп; 12,2% Сг)	8,4	1,36	67...65	0,85...0,95
Сталь Р18	12	0,64	124	0,75...0,9
Сталь коррозионно-стойкая типа 18—8	16,7	0,28	62	0,38...0,5
Алюминий	1,35	2,33	250	0,7...0,75
Медь	0,53	2,8	880...850	0,5...0,55

Определение плотности тока  $j$  и температуры  $\Delta T_2$  осуществляют по-разному в зависимости от способа контактной сварки.

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

### 2.2. Контактная сварка сопротивлением

При контактной сварке сопротивлением ток плотностью  $j$  протекает непрерывно; его среднее значение находят либо расчетным путем, либо с помощью измерительных приборов.



Обычно при сварке сопротивлением низкоуглеродистой стали плотность тока составляет 20...60 А/мм<sup>2</sup>.  
Значение  $\Delta T_1$  находят по формуле (2)

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

Температуру  $\Delta T_2$  определяют, исходя из следующих расчетных предпосылок. Предполагается, что контактное сопротивление  $R$  существует непродолжительное время; при этом в зоне контакта выделяется суммарное удельное количество теплоты (3)

$$Q_2 = k / j \quad (3)$$

где  $k$  — расчетный коэффициент, зависящий от свойств металла и от давления. В табл. 1 максимальным давлениям соответствуют минимальные значения коэффициентов.

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

Теплота  $Q_2$  для определения температуры в поздней стадии процесса считается приложенной мгновенно при  $t = 0$ . Нагрев стержня теплотой  $Q_2$  вызывает дополнительное повышение температуры и удельного сопротивления.

Моменту достижения в стыке температуры  $T_n$ , равной температуре сваривания металла (для стали, например, 1550...1650 К), соответствует определенное значение произведения  $j^2 t_n$  (см. табл. 1), где  $t_n$  – продолжительность нагрева стержней при сварке.

При этом для осуществления сварки необходимо также прогреть околоконтактную зону выше температуры  $T_d$  пластического деформирования (для стали  $T_d = 800...1000$  К), с тем чтобы обеспечить достаточную пластическую осадку.

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

В стадии выравнивания после окончания нагрева при  $t > t_n$  температуру определяют отдельно для  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  по схеме бесконечного стержня (4):

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_{1n}}{2} \left\{ \Phi \left[ \frac{x+l}{\sqrt{4a(t-t_n)}} \right] - \Phi \left[ \frac{x-l}{\sqrt{4a(t-t_n)}} \right] \right\}$$

(4)

где  $2l$  - длина нагреваемой части;  
 $\Delta T_{1n}$  - приращение температуры  $\Delta T_1$  в момент окончания нагрева;  $t$  - полное время процесса с момента начала нагрева.

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

После окончания нагрева процесс распространения теплоты, описываемый уравнением (5), продолжается, а процесс дополнительного тепловыделения, выражаемый членом  $\beta\omega_0 t$ , прекращается при  $t=t_H$  (6)

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}} e^{-x^2/(4at)} + \beta\omega_0 t$$

(5)

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}} e^{-x^2/(4at)} + \beta\omega_0 t_H$$

(6)

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

### 2.3. Контактная точечная сварка

При точечной сварке теплота, выделяемая в зоне между электродами, расходуется на нагрев свариваемого металла и на нагрев участка электродов, прилегающих к зоне сварки.

Теплота, идущая на нагрев свариваемого металла, состоит из:

1) теплоты, затрачиваемой на расплавление столбика металла свариваемых листов толщиной  $2\delta$ , находящегося между электродами диаметром  $d$ , (рис. 2, а):

$$Q_1 = (\pi d^2/4) 2\delta c_p (T_{пл} - T_H) \quad (7)$$

где  $c_p(T_{пл} - T_H)$  — среднее теплосодержание единицы объема расплавленного металла

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

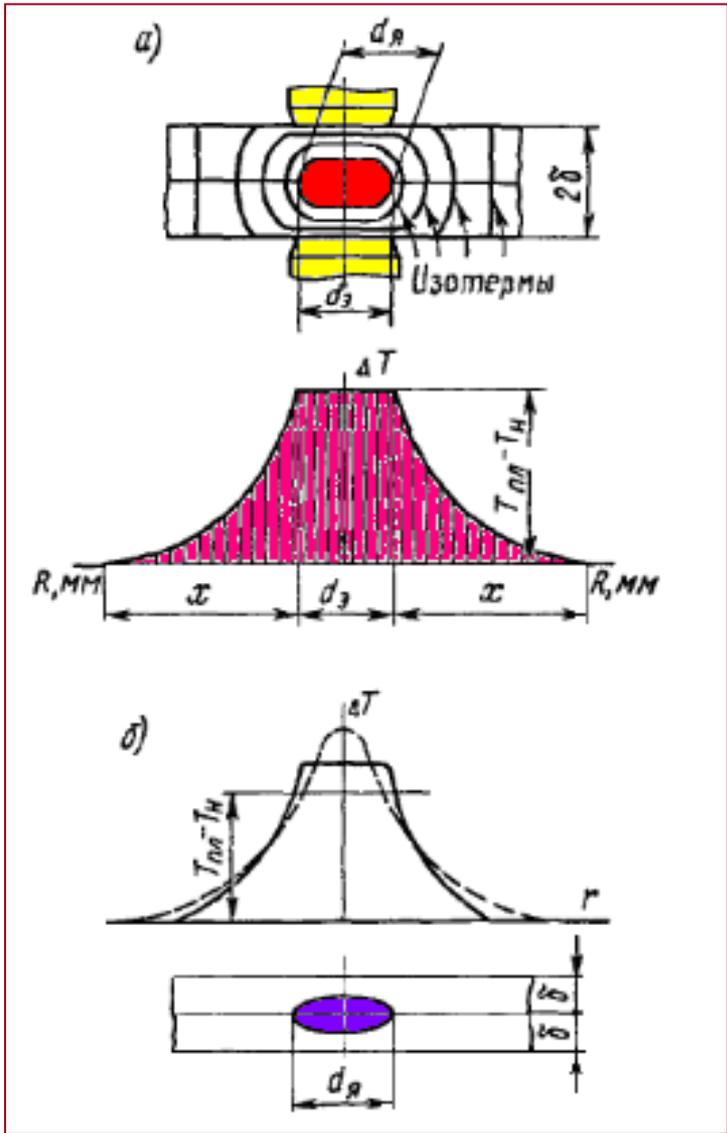


Рис. 2 – Распределение приращений температуры при точечной сварке:  
а – в момент выключения тока для определения выравнивания температур;  
б – действительное и расчетное для определения  $T$

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

2) теплоты, затрачиваемой на нагрев кольца металла шириной  $x$ , окружающего центральный столбик. Условно принимается, что объем этого кольца  $\pi x(d_3 - x)2\delta$ , а средняя температура нагрева металла  $(T_{пл} - T_H)/4$

$$Q_2 = k_1 \pi x (d_3 + x) 2\delta c_p (T_{пл} - T_H) / 4, \quad (8)$$

где  $k_1 = 0,8$  — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева кольца.

Размер  $x$  зависит от температуропроводности металла и времени сварки;  $x = 4\sqrt{at}$ .

Если диаметр электрода  $d$ , в зоне контакта неизвестен, можно принимать его равным диаметру ядра точки  $d_я$ .

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

Введенная в металл теплота  $Q=Q_1 + Q_2$  после окончания сварки и разведения электродов распространяется в пластинах и отдается в окружающее пространство.

Температурное поле на этой стадии (рис. 2, б, штриховая линия) описывается схемой мгновенного нормального кругового источника теплоты в пластине с теплоотдачей:

$$\Delta T = \frac{Q/(2\delta)}{4\pi\lambda(t_0+t)} e^{-r^2/([4\alpha(t_0+t)] - \alpha t/(c\rho\delta))}, \quad (9)$$

где  $t$  — время, прошедшее после выключения тока и разведения электродов;  $t_0$  — постоянная времени, характеризующая распределенность теплоты в пластине по радиусу в момент выключения тока.

## 2. Тепловые процессы при контактной сварке и сварке с применением давления

В ряде случаев  $t_0$  можно принимать близким к  $t_{св}$ . Вследствие приблизительного описания начального распределения температур при  $t=0$  уравнение (9) дает достоверные результаты при температурах в центре пластины ниже  $0,5(T_{пл}-T_n)$ , когда роль величины  $t_0$  невелика. На этой поздней стадии скорость охлаждения центральной зоны точки вычисляют по формуле

$$w = \frac{4\pi\lambda(T - T_n)^2}{Q/(2\delta)}, \quad (10)$$

где  $T_n$  — начальная температура свариваемых листов.

Чем жестче режимы сварки, тем меньше  $Q$  и тем выше скорость охлаждения. При применении внешнего водяного охлаждения скорости охлаждения будут значительно больше рассчитанных по формуле (10).

# Задание для самостоятельного изучения:

*Дугоконтактная сварка труб*

Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» // В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.;  
Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. Шк., 1988. – (С. 246-248 с.)





**Кафедра технології металлов и матеріалознавства**

**Лузан Сергей Алексеевич**

**E-mail: [khadi.luzan@gmail.com](mailto:khadi.luzan@gmail.com)**

**г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М**

**Тел. 097-174-19-15**