



# 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 9. **Нагрев и плавление металла при сварке**

## План лекции

1. Размер зоны нагрева
2. Термический цикл при однопроводной сварке.  
Максимальные температуры.
3. Мгновенная скорость охлаждения при  
данной температуре
4. Длительность пребывания металла выше  
данной температуры

## Размер зоны нагрева

Для оценки термического влияния на свариваемый металл бывает необходимо определить ширину  $2l$  зоны, приращение температуры которой выше заданного  $\Delta T$ ,

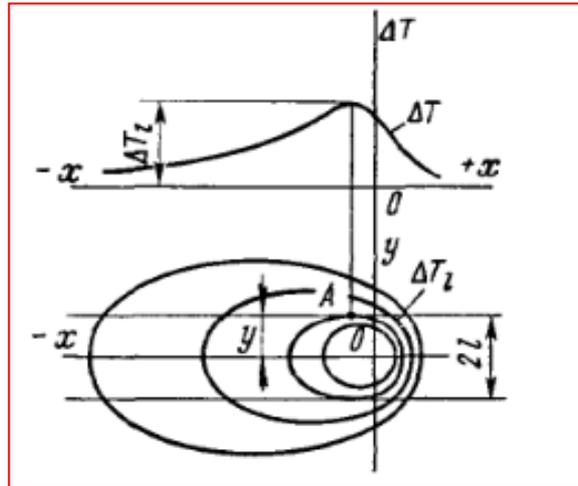


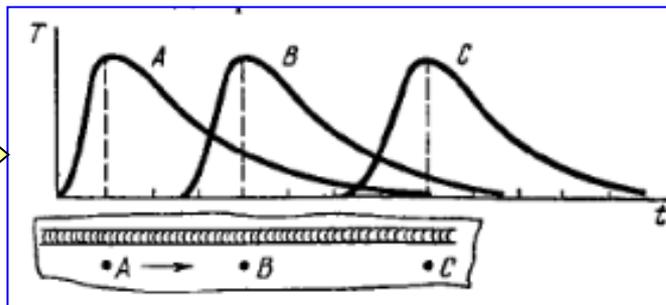
Схема определения ширины  $2l$  зоны, приращение температуры в которой превосходило  $\Delta T$

В общем случае ширина зоны нагрева выше  $\Delta T$ , равная  $2l$ , будет найдена, если определить координату  $y$  точки  $A$ . Точка  $A$ , во-первых, находится на изотерме  $\Delta T = \Delta T_1$ , следовательно,  $\Delta T = \Delta T_1$ , во-вторых, в точке  $A$  достигается максимальное приращение температуры на расстоянии  $y = l$ , т.е.  $\partial T / \partial x = 0$ .



# Термический цикл при однопроходной сварке. Максимальные температуры.

В процессе однопроходной сварки источник теплоты перемещается в теле и вместе с ним перемещается температурное поле. Температуры точек тела непрерывно изменяются



Вначале температура повышается, достигает максимального значения, а затем снижается.



Изменение температуры  
в точках тела  $A$ ,  $B$ ,  $C$   
со временем

В более удаленных точках температура повышается медленнее и позже достигает максимального значения. Восходящая ветвь температурной кривой называется стадией нагрева, нисходящая – стадией остывания.



# Термический цикл при односторонней сварке. Максимальные температуры.

Максимальные температуры, достигаемые отдельными точками, определяются достаточно просто, если известно температурное поле. В точке максимальной температуры первая производная по времени или по расстоянию равна нулю:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Производная по времени или по расстоянию берется в зависимости от того, какую координату содержит выражение для температурного поля. Время  $t$  и координата  $x$ , как известно, связаны между собой скоростью сварки.

Время  $t$  и координата  $x$ , как известно, связаны между собой скоростью сварки.



# Термический цикл при однопроводной сварке. Максимальные температуры.

Аналитическое определение максимальной температуры в массивном теле и в пластине, если за исходные брать формулы (2) и (5), приведенные в лекции 7,:

$$\Delta T_{np} = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)}$$

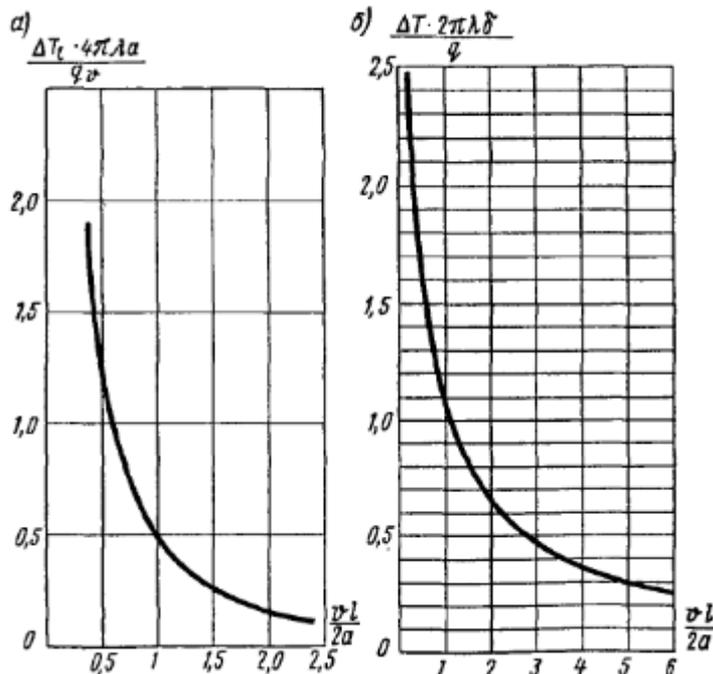
$$\Delta T_{np} = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} e^{-vx/2a} K_0\left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}\right)$$

сопряжено с трудностями. Максимальную температуру аналитически выразить не удастся.



# Термический цикл при однопроходной сварке. Максимальные температуры.

Другой путь  
определения  
максимальной  
температуры  
состоит в  
использовании  
номограмм



Номограммы  
для опреде-  
ления ширины  
зоны нагрева  $2l$   
движущимся  
источником  
теплоты

Вычисляют значение  $v l / 2 a$ , где  $l = y_0$ , находят величину параметра на вертикальной оси, а затем определяют максимальную температуру  $T_{\max} = \Delta T_c + T_n$ . Необходимо иметь в виду, что кривая на рис. 3, б вычислена по формуле (5, лк. 7) без учета теплоотдачи, т.е. при  $b=0$ .



# Термический цикл при однопроводной сварке. Максимальные температуры.

Кроме этого, возможно определение максимальной температуры в предположении, что источник нагрева быстро движущийся

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda t} e^{-r^2/4at} + T_n$$

Для точечного источника теплоты на поверхности массивного тела путем использования формул

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

где  $b=2\alpha/c\rho\delta$

получаем:

$$T_{\max} - T_n = \frac{2q}{\pi e\nu c\rho r_0^2}$$

где  $r_0^2 = y_0^2 + z_0^2$



# Термический цикл при однопроводной сварке. Максимальные температуры.

Для линейного источника теплоты в пластине из формул

$$T_0 = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} e^{-y^2/4at-bt} + T_n$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

находим:

$$T_{\max} - T_n = \frac{q}{\sqrt{2\pi v c \rho} \delta y_0} \left(1 - \frac{by_0}{2a}\right)$$

где  $y_0$  – расстояние от данной точки до оси шва.

При сварке в условиях нормальной температуры, хотя подогрев как таковой отсутствует,  $T_n \approx 290-300$  К.



# Мгновенная скорость охлаждения при данной температуре

Мгновенная скорость охлаждения  $w$  является первой производной температуры по времени

$$w = \partial T / \partial t \quad (1)$$

Скорости охлаждения обычно определяют только для оси шва ввиду их незначительного отличия от скоростей охлаждения околошовных зон

$$T - T_n = q / 2\pi\lambda vt \quad (2)$$

Температуры точек оси шва при наплавке валика на массивное тело

$$T - T_n = q / v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t} \quad (3)$$

Температуры точек оси шва при наплавке однопроходной сварке пластин встык



# Мгновенная скорость охлаждения при данной температуре

Если по формуле (1) вычислить производные от выражений (2) и (3) (сл.10), т.е.

$$dT / dt = -q / 2\pi\lambda vt^2 \quad (4)$$

$$dT / dt = q / 2v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t^3} \quad (5)$$

и в уравнения (4) и (5) подставить значения  $t$  из уравнений (2) и (3), то получим скорости охлаждения:

$$w = -2\pi\lambda \frac{(T - T_n)^2}{q/v} \quad (6)$$

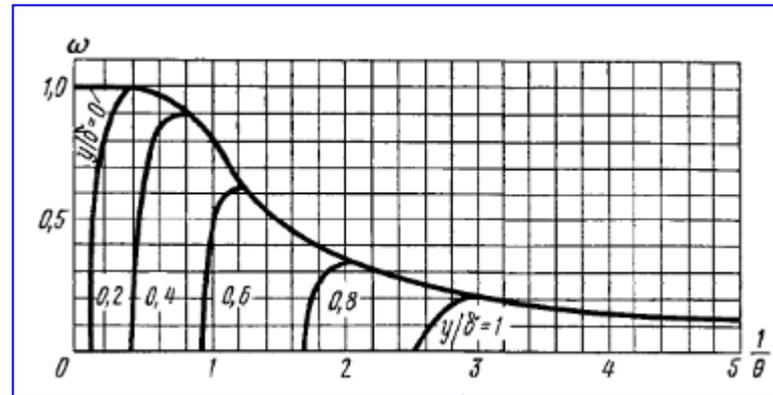
$$w = -2\pi\lambda c\rho \frac{(T - T_n)^3}{(q/v\delta)^2} \quad (7)$$

Знак минус в уравнениях (6) и (7) показывает, что происходит остывание металла. Скорость охлаждения зависит от формы изделия (массивное тело, пластина), эффективной погонной энергии  $q/v$  и температуры подогрева  $T_n$ . Температура подогрева  $T_n$  практически позволяет в большей степени регулировать скорость охлаждения, чем эффективная погонная энергия.



# Мгновенная скорость охлаждения при данной температуре

При сварке по плоскому слою скорость охлаждения также целесообразно определять для точек на оси шва, т.е. для  $y=0$ ,  $z=0$ .



Скорость охлаждения определяют при помощи номограммы

Расчетный график для определения мгновенной скорости охлаждения при наплавке валика на лист



# Мгновенная скорость охлаждения при данной температуре

Вначале необходимо определить критерий

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2q/v}{\pi\delta^2 c\rho(T - T_n)}$$

Т.е. значение аргумента на номограмме, а затем по кривой найти численное значение функции – безразмерного критерия  $\omega$ .

Скорость охлаждения точек плоского слоя определяется по формуле:

$$w = -\omega 2\pi\lambda \frac{(T - T_n)^2}{q/v}$$

При значениях критерия  $1/\theta > 2,5$  скорости охлаждения точек плоского слоя, расположенных по оси движения источника теплоты, почти совпадают со скоростью охлаждения точек пластины, а при  $1/\theta < 0,4$  – со скоростью охлаждения точек полубесконечного тела.



# Длительность пребывания металла выше данной температуры

Длительность пребывания металла выше некоторой температуры  $T$  выражается на рис. отрезком  $t_H$ .

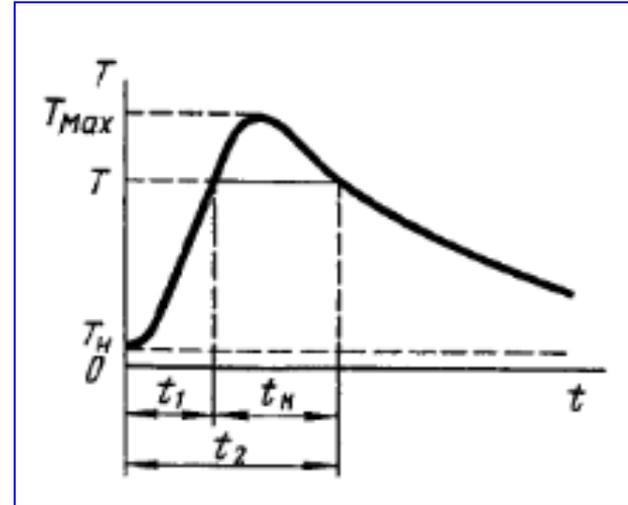


Схема термического цикла при однопроходной сварке

Зависимость  $t_H$  от параметров режима сварки для наплавки на массивное тело

$$t_{3H} = \tau_{3H} r^2 / 4a \quad \text{где} \quad \tau_{3H} = 4at_{3H} / r^2$$

Зависимость  $t_H$  от параметров режима сварки для однопроходной сварки встык

$$t_{2H} = \tau_{2H} y^2 / 4a \quad \text{где} \quad \tau_{2H} = 4at_{2H} / y^2$$



# Задание для самостоятельного изучения:

*Термический цикл и максимальные температуры*

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. 133-136 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**