

# Специальные способы сварки

## Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

## Специальные способы сварки

### Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

#### Основные параметры процесса ЭЛС:

- $U_{\text{уск}}$  – ускоряющее напряжение , кВ;
- $I_{\text{п}}$  – ток пучка , мА;
- $V_{\text{св}}$  – скорость перемещения пучка по поверхности изделия (скорость сварки), м/ч;
- $I_{\text{ф}}$  - ток фокусировки , мА;
- $L_{\text{ф}}$  – фокусное расстояние, мм;
- $d_{\text{п}}$  – диаметр пучка в фокальном пятне , мм;
- положение электронного пучка (ток фокусировки);
- $P_{\text{ост}}$  – остаточное давление газа в вакуумной камере, мм рт.ст.;
- модуляция электронного пучка (импульсный режим, развертка пучка и др.);
- мощность электронного пучка ВА (Вт):
- удельная мощность в пучке Вт/мм<sup>2</sup>:

$$q_{\text{п}} = I_{\text{п}} U_{\text{уск}}$$

$$q_2 = q_{\text{п}} / S_{\text{п}} = I_{\text{п}} U_{\text{уск}} / \pi r^2$$

Ускоряющее напряжение характеризует величину кинетической энергии электронов пучка:

$$m_{\text{э}} v_{\text{э}}^2 = 2eU_{\text{уск}}$$

## Специальные способы сварки

### Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

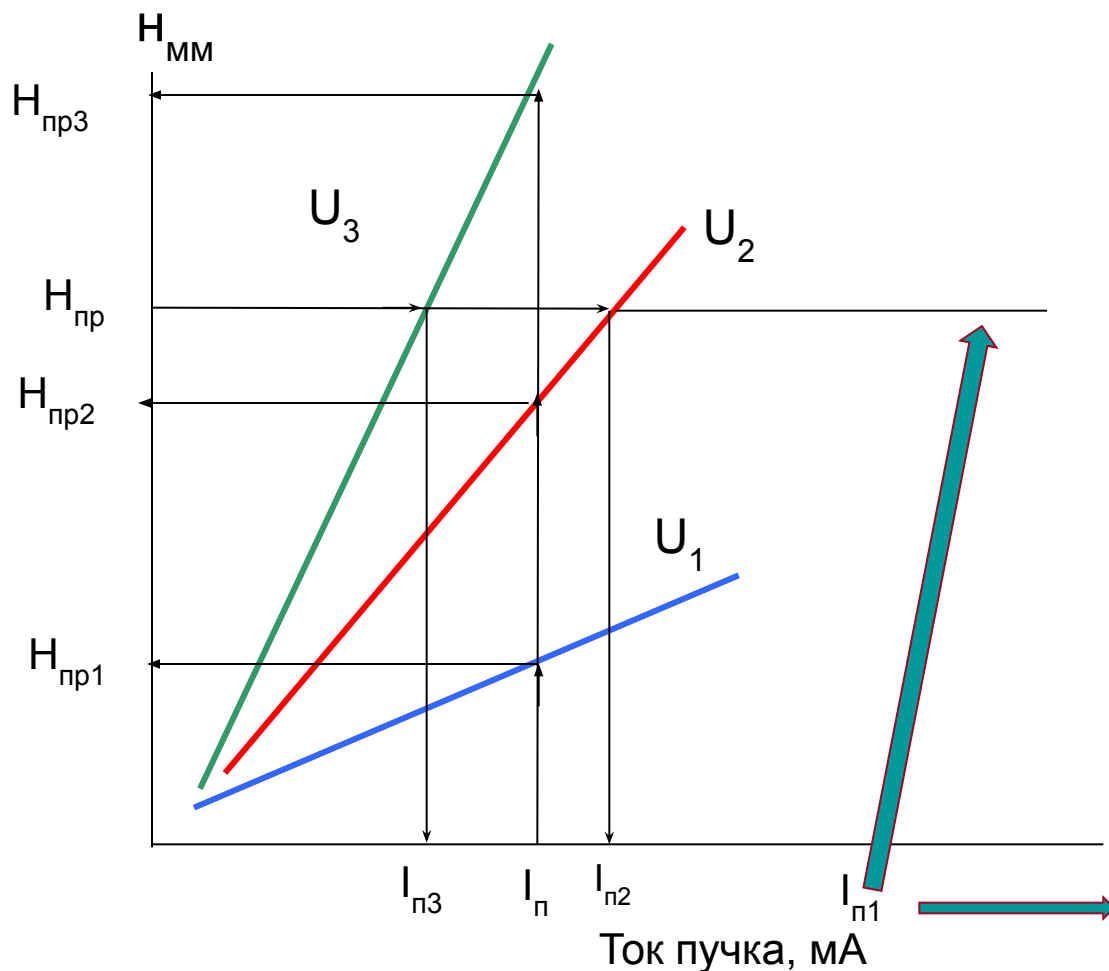
Увеличение ускоряющего напряжения при условии постоянной мощности электронного пучка сопровождается уменьшением рассеивания электронов на атомах пара и уменьшением диаметра пучка

В следствии этого возрастает удельная мощность в пятне нагрева, что приводит к росту глубины проплавления, уменьшению ширины проплава и вытягиванию жидкой ванны вдоль направления движения пучка.

По мере возрастания удельной мощности пучка повышается температура расплавленного металла, увеличивается интенсивность испарения металла и статическое давление пара, что способствует удержанию жидкого металла на вертикальной стенке канала.

Ускоряющее напряжение:  
 $U_1 < U_2 < U_3$  (при  $I_n$  const.)

Ток пучка:  
 $I_{n3} < I_{n2} < I_{n1}$  (при  $H_{пр}$  const.)



## Специальные способы сварки

# Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Ток электронного пучка является составляющей мощности пучка и характеризуется количеством электронов в пучке.

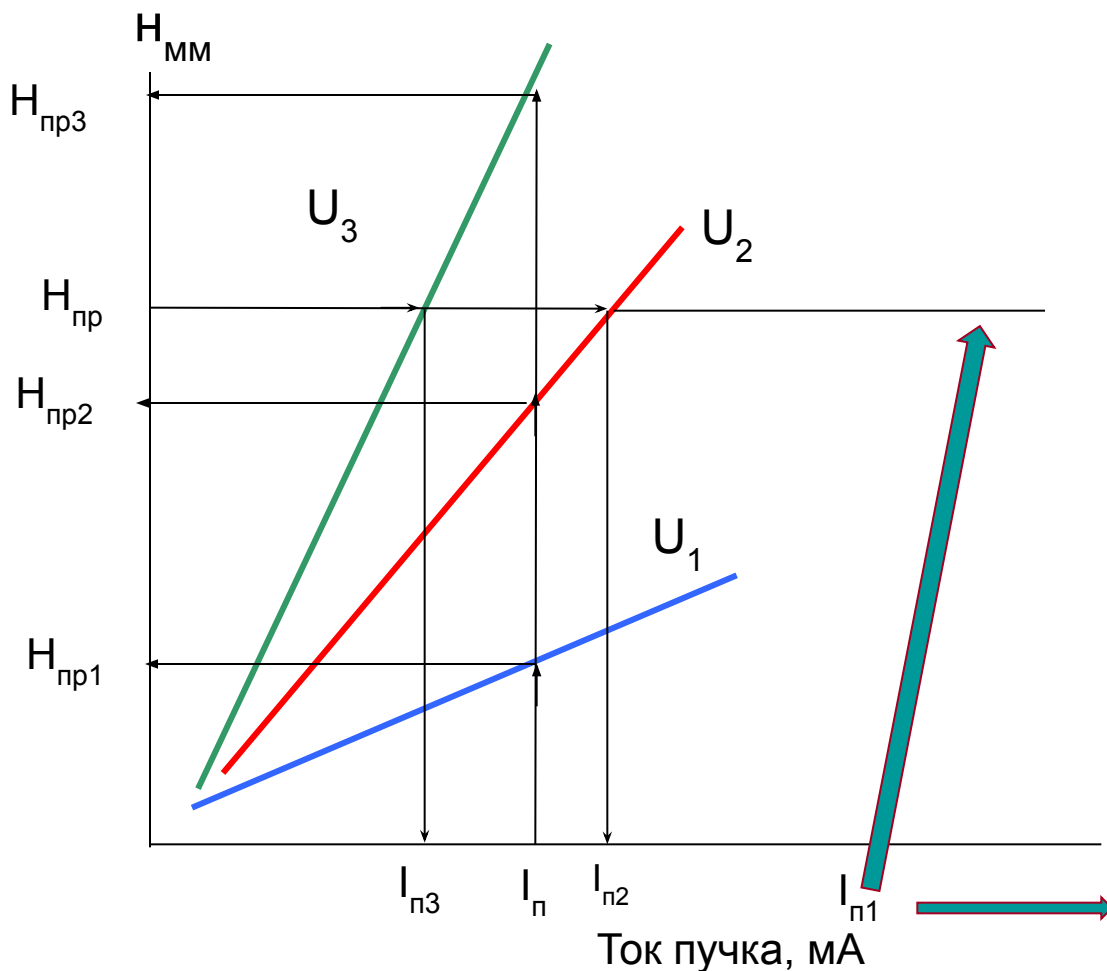
Увеличение тока сопровождается не только возрастанием общей мощности пучка, но и увеличением его диаметра за счет кулоновских сил, расталкивающих электроны.

Это снижает удельную мощность пучка. Установлено, что глубина проплавления увеличивается практически линейно по мере возрастания тока пучка при постоянных значениях ускоряющего напряжения и скорости сварки.

Изменение тока пучка оказывает меньшее, чем изменение ускоряющего напряжения влияние на глубину проплавления.

По мере увеличения тока пучка форма проплавления переходит от полусферической к «кинжальной».

Однако, увеличение глубины проплавления сопровождается увеличением ширины проплавления.

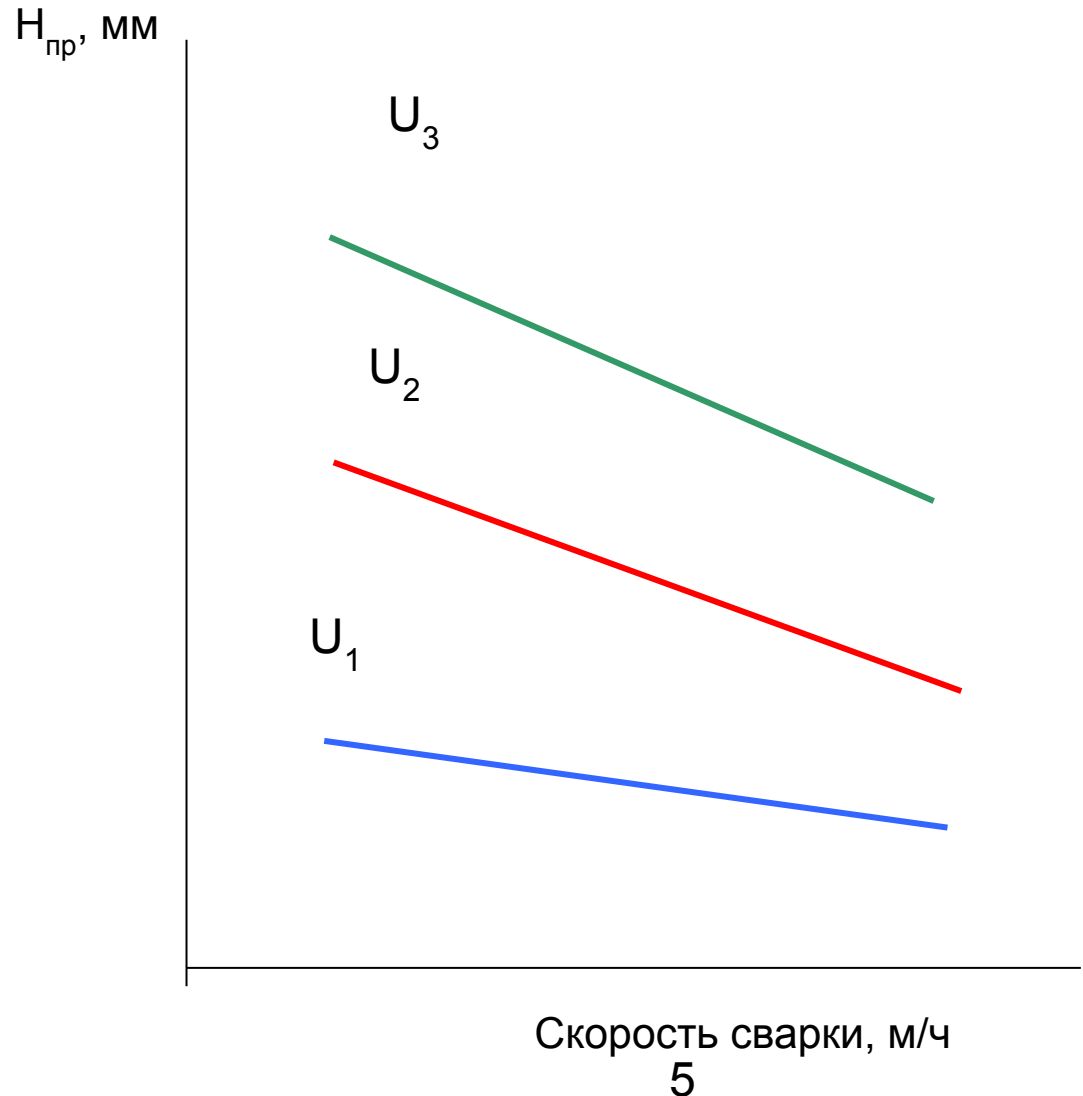


## Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Скорость сварки или скорость перемещения электронного пучка по поверхности изделия также влияет на размеры зоны проплавления .

При ее изменении зона проплавления сохраняет свою первоначальную форму.

Однако, увеличение скорости в 5 раз при прочих равных параметрах приводит к уменьшению проплавления на 34 – 47%.



## Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

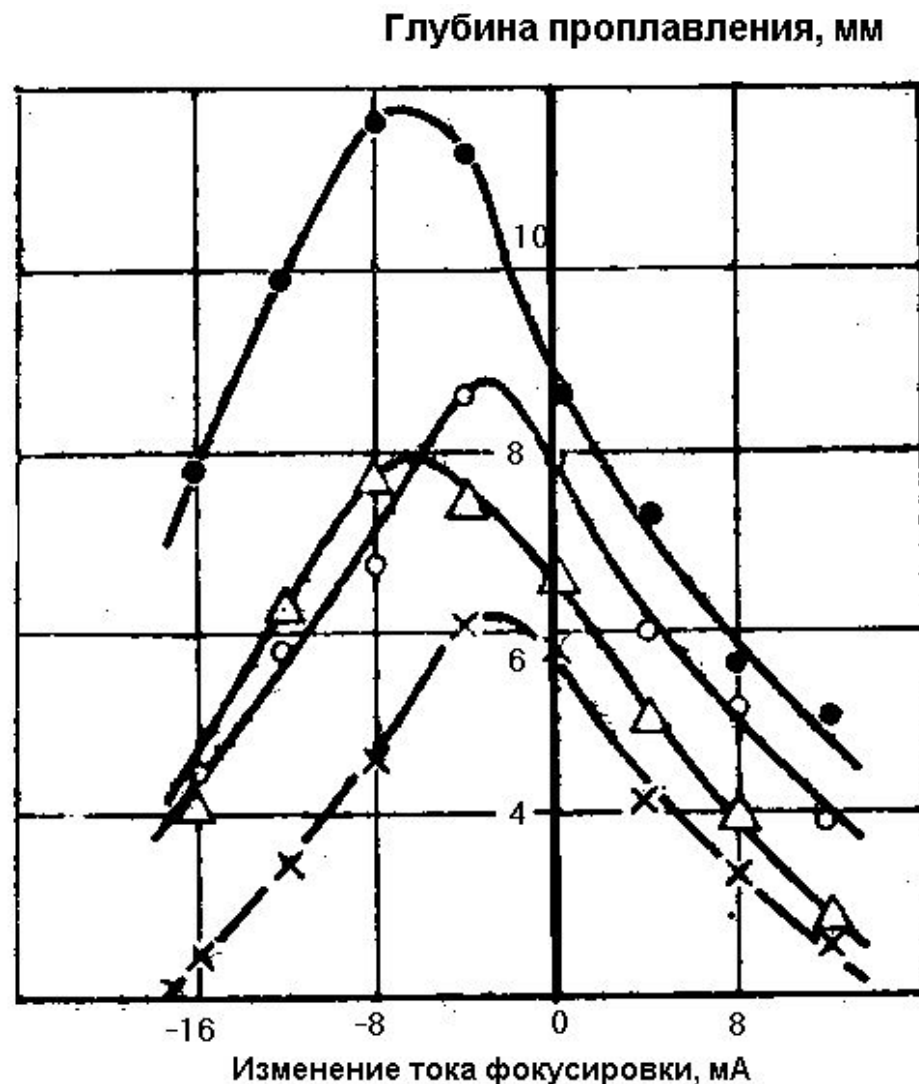
Степень фокусировки является основным параметром ЭЛС, определяющим удельную мощность пучка.

При постоянной погонной энергии можно получить глубину проплавления и 15 мм и 1-2 мм, так как образование «кинжального» проплавления определяется не только количеством вводимой энергии, но и ее плотностью.

При изменении тока фокусирующей линзы меняется фокусное расстояние диаметр пучка на поверхности мишени ( в зоне испарения).

Степень фокусировки пучка может в широких пределах изменять форму проплавления от попу сферической до «кинжальной».

Несмотря на различие в геометрии проплавления их площади сечения при одинаковой погонной энергии различаются не более, чем на 10% отсюда следует, что максимальная глубина проплавления соответствует минимальной ширине шва.



## Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Влияние давления остаточного газа в сварочной камере оказывает влияние на формирование электронного пучка.

В результате прохождения электронов пучка через вакуумный промежуток от пушки до свариваемого изделия они сталкиваются с молекулами газа. При этом происходит ионизация молекул газа. Часть энергии пучка тратится на эти столкновения.

В процессе плавления металла происходит выделений большого количества ионизированного пара металла из парогазового канала.

Ионизированный газ и пары окружают электронный пучок. При этом наблюдается свечение.

При давлении остаточного газа порядка  $10^{-1} - 10^{-2}$  мм рт.ст. ионы газа создают экранировку пучка, которая препятствует изменению диаметра пучка и его развертке.

Происходит как бы самофокусировка пучка, однако минимальное значение диаметра пучка в этом случае несколько выше. Поэтому предварительная установка положения фокуса относительно стыка становится ориентировочной операцией, а имеет смысл при сварке в низком вакууме.

## Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Для снижения энергозатрат ЭЛС при достижении необходимой глубины проплавления требуется установление положения фокуса с заглублением  $0,5 - 0,7 h_{np}$

Таким образом, соответствующим подбором параметров процесса ЭЛС можно обеспечить заданную глубину и форму проплавления.

Для определения глубины проплавления используют критерии подобия, образованные из уравнений температурного поля точечного и линейного источника тепла:

$$\Pi_1 = \frac{V_{св} h_{np}}{a} \quad \Pi_{2,3} = \frac{q}{\lambda T_{пл}} \sqrt{\frac{V_{св}}{ad_n}} \quad \Pi_1 = b \Pi_{2,3}^n$$

$$h_{np} = b \frac{a}{V_{св}} \left[ \frac{q}{\lambda T_{пл}} \sqrt{\frac{V_{св}}{ad_n}} \right]^n$$

$b$  – коэффициент учитывающий влияние эффективного диаметра пучка;

$n$  – коэффициент, учитывающий тип материала  $n=0,68(\lambda T_{пл})0,15$

Для титанового сплава

$b = 5,07 \times 10^{-2}$

$n = 1,28$   
8



## Специальные способы сварки

### Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Связь параметров электронного пучка с характеристиками можно представить в следующем виде:

$$0,24IU\eta_u\eta_T = \rho v F_{np} S_m \quad (1)$$

$F_{np}$  – площадь проплавления

$S_m = (cT_{nl} + L_{nl})$  – теплосодержание жидкого металла при  $T_{nl}$ .

$\eta_u = \frac{q}{IU}$  **эффективный КПД** (отношение количества тепла введенного в металл к тепловой мощности электронного пучка).

$\eta_T = \frac{vF\rho S_m}{q}$  **термический КПД** (отношение теплосодержания проплавленного за единицу времени металла к эффективной тепловой мощности электронного пучка).

В соответствии с нормальным распределением объем, описанный площадью проплавления ( $\text{см}^3$ ):

$$V = \frac{\pi}{k} H^2 \quad (2) \quad \begin{array}{l} k - \text{коэффициент сосредоточенности распределения (см}^{-2}\text{)} \\ H - \text{максимальная глубина проплавления (см).} \end{array}$$

На основании выражения (1) для секундного объема :  $vF_{np} \frac{0,24IU\eta_u\eta_T}{\rho(cT_{nl} + L_{nl})}$

Разделив обе части уравнения (2) на  $t$  :  $\frac{V}{t} = \frac{\pi H^2}{kt}$

## Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Так как  $V/t = VF_{пр}$ , то уравнение (3) можно записать:

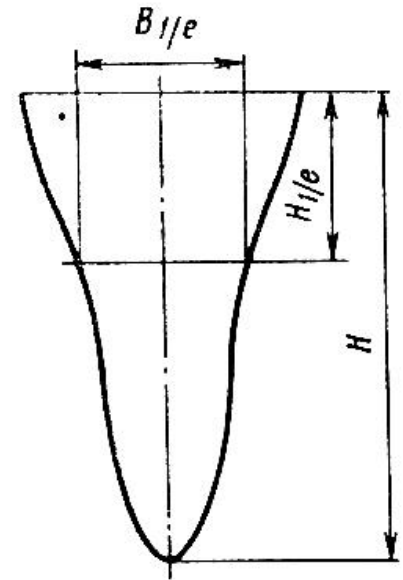
$$\frac{\pi H}{kt} = \frac{0,24IU\eta_u\eta_T}{\rho(cT_{нл} + L_{нл})}$$

Подставляя выражения  $Q = 0,24IU\eta_u/V$ ;  $t \approx d/v$ ,  
где  $d$  – диаметр пучка,

$k = 4/B^2$ ,

где  $B$  – ширина проплавления на уровне  $1/e$  получим:

$$\eta_T Q d = \frac{\pi B^2}{4} H \rho (cT_{нл} + L_{нл}) \quad (4)$$



Уравнение (4) связывает погонную энергию  $Q$  (с учетом концентрации мощности при данном диаметре  $d$ ) с глубиной проплавления  $H$  и шириной шва  $B$ .

Это уравнение описывает тепловой баланс процесса ЭЛС с точностью 10%. Для более точного требуется учитывать затраты тепла на испарение. Однако в практике такая точность является достаточной.

## Специальные способы сварки

### Параметры электроннолучевой сварки и геометрия зоны проплавления

Для значений  $U=130\text{кВ}$ ,  $I=13\text{мА}$ ,  $v=1\text{ см/с}$ ,  $\eta_T=0,484$  и теплофизических свойств нержавеющей стали:

$\eta_u=0,95$ ;  $\rho=7,9\text{г/см}^3$ ;  $c=0,114\text{кал/г град}$ ;  $T_{пл}=1460\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $L_{пл}=65\text{кал/г}$

Расчетная геометрия проплавления и экспериментальные данные приведены в табл.

Сравнение расчетной и экспериментальной глубины проплавления

Экспериментальные данные			Расчетная глубина проплавления, мм
Диаметр луча $d, \text{мм}$	Ширина шва $B, \text{мм}$	Глубина проплавления, мм	
0,10	0,40	8,5	8,1
0,15	0,50	8,2	7,8
0,20	0,60	8,0	7,3
0,30	0,75	7,1	7,0
0,37	0,90	6,1	5,9
0,43	1,00	5,0	5,6

